



Universidade de Brasília

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - FAU

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**RELAÇÕES ENTRE AS ÁREAS DE RECARGA DOS AQUÍFEROS  
E ÁREAS DESTINADAS A URBANIZAÇÃO: ESTUDO DOS  
PADRÕES DE OCUPAÇÃO DO SOLO DA UNIDADE  
HIDROGRÁFICA DO PARANOÁ - DF**

**Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga Seraphim**

**Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo de Lima Bezerra**

**Brasília  
2018**

Universidade de Brasília

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - FAU

Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

**RELAÇÕES ENTRE AS ÁREAS DE RECARGA DOS AQUÍFEROS E  
ÁREAS DESTINADAS A URBANIZAÇÃO: ESTUDO DOS PADRÕES DE  
OCUPAÇÃO DO SOLO DA UNIDADE HIDROGRÁFICA DO PARANOÁ -  
DF**

Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga Seraphim

Dissertação de Mestrado aprovada  
como requisito parcial à obtenção do  
grau de Mestre pelo Programa de  
Pós-Graduação da Faculdade de  
Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade de Brasília.

Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo de Lima Bezerra  
Banca Examinadora: Professor Dr. Daniel Sant'ana  
Professor Dr. Sergio Koide

**Brasília**

**2018**

Seraphim, Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga Seraphim  
**Relações entre as áreas de recarga dos aquíferos e áreas destinadas a urbanização: estudos dos padrões de ocupação do solo da Unidade Hidrográfica do Paranoá - DF** / Ana Paula Albuquerque Campos Costalonga Seraphim - Brasília, 2018.  
xiii, 193f.

Orientadora: Maria do Carmo de Lima Bezerra  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Brasília, Programa de Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Brasília, 2018.

Título em inglês: Relations between aquifers recharge areas and areas suitable for urbanization: studies of soil occupation patterns of the Paranoá Hydrographic Unit - DF.

**1. Planejamento urbano ecológico 2. Recarga de aquíferos 3. Condicionantes físicos da urbanização 4. Infiltração natural nas cidades 5. Tipologias urbanas sensíveis a água**

*Dedico esta pesquisa a minha família amada  
e aos meus queridos amigos e amigas.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Paulo e Sonia, pelos incansáveis incentivos e ensinamentos que me trouxeram aqui. À minha mãe, Sonia, por nunca desistir dos meus sonhos. À minha irmã, Deborah, pelo suporte e compreensão desde o início dessa jornada. Ao meu irmão, Gabriel, pelos conselhos de irmão mais velho. E às minhas sobrinhas, Maria Luísa e Iolanda, pelos últimos anos de alegria.

Agradeço ao meu noivo, Tiago, eterna fonte de inspiração e companheirismo, que ao longo dessa caminhada sempre ouviu os problemas e ofereceu carinho e conselhos.

Aos meus queridos amigos e amigas, que tornaram esse percurso mais afável e menos solitário. Dentre eles, à Patrícia, cujo sempre aberto suporte foi importante para conclusão desse processo.

Agradeço aos colegas da pós-graduação, pelo compartilhamento de conhecimento, experiências e apoio mútuo.

Agradeço também aos colegas de trabalho, da SEGETH, pela inspiração diária e apoio ao desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço especialmente à Professora Maria do Carmo, por sua dedicada orientação, transferência de conhecimento, disponibilidade, respeito, amizade e paciência, sem os quais essa dissertação não seria possível.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	VII
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	XIII
<b>RESUMO</b> .....	1
<b>SUMMARY</b> .....	2
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	3
Problema.....	5
Premissa.....	8
Objetivo.....	8
Procedimentos metodológicos.....	9
Estrutura da Pesquisa.....	13
<b>CAPÍTULO 01 – Bases da Sustentabilidade e Ecologia para um Planejamento Urbano Sensível a Água</b> .....	16
1.1. Noções de Sustentabilidade e Ecologia Urbana.....	16
1.2. Contribuições da Sustentabilidade e ecologia para gestão da água na cidade por meio do planejamento urbano .....	22
<b>CAPÍTULO 02 - Relações entre o processo de recarga dos aquíferos e o processo de urbanização</b> .....	33
2.1. Definições relacionadas ao processo de recarga dos aquíferos.....	33
2.2. Os condicionantes do meio físico para o processo de urbanização e suas relações com as áreas de recarga .....	45
2.2. Alterações na recarga dos aquíferos causadas pelo processo de urbanização.....	49
<b>CAPÍTULO 03 - Elementos da forma urbana com implicações sobre a perda de infiltração natural das águas pluviais no solo</b> .....	55
3.1. Fatores relacionados com a infiltração natural das águas pluviais nas cidades.....	55
3.2. Relações entre a forma urbana e a infiltração de água no solo.....	84
<b>CAPÍTULO 04 - Relações entre as áreas propícias à recarga dos aquíferos e à urbanização no Distrito Federal</b> .....	95
4.1. Caracterização dos aquíferos do Distrito Federal.....	95
4.2. Fatores do meio físico intervenientes no processo de recarga e ocupação urbana do Distrito Federal.....	101
4.3. Processo de ocupação urbana no Distrito Federal.....	121

**CAPÍTULO 05 - Impactos das tipologias de ocupação urbana sobre as áreas de recarga dos aquíferos: estudo da Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá no Distrito Federal ... 135**

5.1. Alterações na cobertura do solo sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga de aquíferos no Distrito Federal .....	135
5.2. Estudo da área urbanizada da Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá no Distrito Federal.....	154
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>169</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>173</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>181</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>182</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>183</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>185</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Organização da pesquisa. Própria autoria, 2018.....	13
<b>Figura 1.1</b> – Matrizes discursivas associadas com a construção da noção de desenvolvimento sustentável. Fonte: Própria autoria (2017).....	16
<b>Figura 1.2</b> - Disciplinas e práticas incorporadas pela abordagem da "Ecologia na Cidade". Fonte: MCPHEARSON et al., 2016, p. 203.....	21
<b>Figura 1.3</b> - Alterações no ciclo natural da água causadas pela urbanização. Fonte: (CONRADIN, 2010).....	23
<b>Figura 1.4</b> - Conexões entre os serviços ecossistêmicos e a qualidade de vida (MEA, 2005, p. 50). .....	28
<b>Figura 2.1</b> – Volume estimado dos reservatórios naturais de água e seu tempo de permanência. Fonte: adaptado de GHOSH e DESAI (2006), p. 2.....	33
<b>Figura 2.2</b> - Distribuição da água no subsolo. Fonte: (ACQUASOLO, [S.d.]) .....	34
<b>Figura 2.3</b> – Classificação da estrutura dos poros aquíferos. Fonte: (SILVA, [S.d.]).....	36
<b>Figura 2.4</b> – Fluxo de água subterrânea. Fonte: (SILVA, [S.d.]).....	39
<b>Figura 2.5</b> - Arranjo das raízes de árvores no solo e sua contribuição para aumento de sua porosidade. Fonte: AMARAL, 2015.....	42
<b>Figura 2.6</b> – Ilustração de bacia de retenção. Fonte: HINMAN, 2012.....	51
<b>Figura 2.7</b> - Relação entre o processo de recarga, distribuição da água, características do meio físico e biótico e funções ecossistêmicas. Própria autoria, 2018.....	53
<b>Figura 3.1</b> – Relação entre porcentagens de superfícies impermeáveis e saúde do regime hídrico. Fonte: Arnold; Gibbons, 1996 .....	59
<b>Figura 3.2</b> - Mudanças no ciclo hidrológico e aumento de superfícies impermeabilizadas. Fonte: Environmental Protection Agency, 1993 apud Arnold; Gibbons, 1996.....	60
<b>Figura 3.3</b> – Canteiro de obras limpo e serraplanado. Fonte: <a href="http://evotto.com.br">http://evotto.com.br</a> .....	63
<b>Figura 3.4</b> - Efeito da compactação e da umidade em solos arenosos. Fonte: PITT et al., 2009	64
<b>Figura 3.5</b> - Efeito da compactação e da umidade em solos argilosos. Fonte: PITT et al., 2009	64
<b>Figura 3.6</b> – Percentuais médios da distribuição de superfícies em lotes de áreas similares antes e depois da implementação do LID. Fonte: PRINCE GEORGES COUNTY, 2000 .....	74
<b>Figura 3.7</b> – Exemplo de design de um terreno residencial unifamiliar de baixa densidade e alta densidade utilizando as diretrizes supracitadas. FONTE: GEORGES, 200 e HINMAN, 2012..	75
<b>Figura 3.8</b> – Relação entre as áreas impermeáveis e densidade urbana em bairros de São Paulo, Curitiba e Porto Alegre. Fonte: COMPANA; TUCCI, 1994 apud MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001.....	75

<b>Figura 3.9-</b> Diferentes traçados de vias com suas diferentes áreas de cobertura num determinado empreendimento. Fonte: PRINCE GEORGES COUTY, 2000.....	80
<b>Figura 3.10-</b> Layout híbrido entre grelha e curvilíneo com inserção de espaços abertos. Fonte: HINMAN, 2012 .....	80
<b>Figura 3.11</b> –Exemplo da redução do total de abertura impermeável a partir da redução do tamanho de bolsões de retorno a vagas laterais. Fonte: HINMAN, 2012.....	81
<b>Figura 3.12</b> - Demonstração de projeto de via com redução da largura e direcionamento do escoamento para áreas com capacidade de infiltração da água em Seattle, EUA. Fonte: HINMAN, 2012 .....	82
<b>Figura 3.13</b> –Rua de acesso residencial em Vancouver que utiliza uma combinação de concreto com pavimentos vazados e grama. Fonte: HINMAN, 2012 .....	82
<b>Figura 3.14</b> – Relação entre os elementos do tecido urbano e as estratégias de urbanização sensíveis a infiltração da água da chuva com as condicionantes da perda dessa infiltração na área urbana . Própria autoria, 2018 .....	84
<b>Figura 3.15</b> – Exemplos de traçado viário. Fonte: SILVA, 2014.....	87
<b>Figura 3.16</b> – Exemplos de distribuição dos espaços públicos. Fonte: SILVA, 2014 .....	87
<b>Figura 3.17</b> - Exemplo da ocupação dos lotes entre áreas edificadas e espaços livres. Fonte: SILVA, 2014.....	88
<b>Figura 4.1</b> – Mapa dos Sistemas de aquíferos intergranulares ou rasos do Distrito Federal e das pedologias predominantes associadas a cada sistema. Própria autoria, 2018, com dados de GDF, 2017.....	97
<b>Figura 4.2</b> – Mapa dos Sistemas de aquíferos rasos e profundos do Distrito Federal. Fonte: Gonçalves, 2007.....	99
<b>Figura 4.3</b> - Compartimentação geomorfológica do Distrito Federal. Fonte:GDF & Greentec, 2011.....	104
<b>Figura 4.4</b> –Mapa de solos do Distrito Federal. Fonte:GONÇALVEZ 2007, modificado de EMBRAPA, 1978. ....	106
<b>Figura 4.5</b> - Carta bioclimática do Distrito Federal. Fonte: ABNT NBR 15520 .....	107
<b>Figura 4.6</b> – Total pluviométrico anual entre 2006 e 2016 no Distrito Federal. Própria autoria, 2017. Fonte de dados: ANA.....	107
<b>Figura 4.7</b> - Total pluviométrico mensal entre 2014 e 2017 no Distrito Federal, com normal climatológica de 1961 a 1990. Fonte InMET.....	108
<b>Figura 4.8</b> - Mapa da distribuição pluviométrica média no território do Distrito Federal entre 1960 e 2006. Fonte: GONÇALVEZ, 2007. ....	109
<b>Figura 4.9</b> – Quatro modelos conceituais de fluxo da água subterrânea para o Distrito Federal desenvolvidos por Lousada e Campos (2005). Fonte: SOUZA, 2013 .....	111

<b>Figura 4.10</b> – Mapa do potencial de recarga dos aquíferos do Distrito Federal. Fonte: Gonçalves, 2007.....	112
<b>Figura 4.11</b> - Mapa de risco ecológico de perda de área de recarga de aquífero do ZEE/DF. Fonte: GDF, 2017.....	114
<b>Figura 4.12</b> – Mapa de potenciais de recarga do Distrito Federal. Própria autoria, 2018. Com dados de ZEE/DF e Siturb.....	117
<b>Figura 4.13</b> - Percentuais ocupados pelas áreas que representam as categoria de potencial de recarga. Própria autoria, 2018. ....	117
<b>Figura 4.14</b> – Mapa de potenciais de urbanização do Distrito Federal. Própria autoria, 2018. Com dados de ZEE/DF e Siturb.....	120
<b>Figura 4.15</b> - Percentuais ocupados pelas áreas que representam as categorias de potencial de recarga. Própria autoria, 2018. ....	120
<b>Figura 4.16</b> - Quadrilátero Cruls e Retângulo Belcher, com as 5 áreas escolhidas pelo Relatório Belcher como as mais propícias para ocupação e a delimitação definitiva do Distrito Federal, traçada em 1955. Fonte: MANCINI, 2008.....	123
<b>Figura 4.17</b> – Mapa de sobreposição da área urbanizada em 1964 ao mapa de potenciais de recarga de aquíferos. Própria autoria, 2018. Dados do ZEE/DF e Siturb. ....	124
<b>Figura 4.18</b> - Zoneamento do PEOT 1977. Fonte: MANCINI, 2008. ....	126
<b>Figura 4.19</b> – Zoneamento do Brasília Revisitada.....	126
<b>Figura 4.20</b> – Mapa de sobreposição da Macrozona urbana do POUZO/1986 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 1986. Própria autoria, 2018. Dados do ZEE/DF e Siturb.....	127
<b>Figura 4.21</b> – Mapa de sobreposição da Macrozona urbana do PDOT/1992 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 1991. Própria autoria, 2018. Dados de ZEE/DF e Siturb.....	129
<b>Figura 4.22</b> – Mapa de sobreposição da Macrozona urbana do PDOT/1997 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 1997. Própria autoria, 2018. Dados de ZEE/DF e Siturb.....	130
<b>Figura 4.23</b> – Mapa de sobreposição da Macrozona urbana do PDOT/2009-2012 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 2016. Própria autoria, 2018. Dados de ZEE/DF e Siturb. ....	132
<b>Figura 5.1</b> – Exemplos de manipulação do solo na implantação de empreendimentos habitacionais no Distrito Federal, imagens de 2016.....	136
<b>Figura 5.2</b> – Relações entre áreas do Cerrado e as regiões hidrográficas brasileiras. Modificado de Lima, 2011.....	137

<b>Figura 5.3</b> – Mapa de cobertura do solo do Distrito Federal em 1953, classificadas em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, 2018, com dados de VERÍSSIMO, 2002.....	139
<b>Figura 5.4</b> – Mapa de cobertura do solo do Distrito Federal em 1975, classificadas em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, 2018, com dados do SIURB e NOVAES et al., 2016 .....	139
<b>Figura 5.5</b> – Mapa de cobertura do solo do Distrito Federal em 1986, classificadas em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, 2018, com dados do SIURB e NOVAES et al., 2016 .....	140
<b>Figura 5.6</b> – Mapa de cobertura do solo do Distrito Federal em 1997, classificadas em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, 2018, com dados do SIURB e NOVAES et al., 2016 .....	140
<b>Figura 5.7</b> – Mapa de cobertura do solo do Distrito Federal em 2009, classificadas em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, 2018, com dados do SIURB e NOVAES et al., 2016 .....	141
<b>Figura 5.8</b> – Mapa de cobertura do solo do Distrito Federal em 2016, classificadas em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, 2018, com dados do SIURB e NOVAES et al., 2016 .....	141
<b>Figura 5.9</b> – Crescimento temporal das áreas urbanizadas em cada potencial de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018. ....	142
<b>Figura 5.10</b> - Redução temporal das áreas de cobertura vegetal nativa e reflorestada em cada potencial de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018. ....	142
<b>Figura 5.11</b> – Crescimento temporal de outras coberturas em cada potencial de recarga de aquíferos. Própria autoria, 2018.....	143
<b>Figura 5.12</b> – Mapa de sobreposição das áreas com cobertura vegetal nativa ou reflorestada em 1953 aos potenciais de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018. Dados de VERÍSSIMO, 2002 e ZEE/DF. ....	143
<b>Figura 5.13</b> – Mapa de sobreposição das áreas com cobertura vegetal nativa ou reflorestada em 2016 aos potenciais de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018. Dados de NOVAES, 2016 e ZEE/DF.....	144
<b>Figura 5.14</b> – Coberturas do solo das áreas de diferentes potenciais de recarga dos aquíferos em 2016. Própria autoria, 2018.....	144
<b>Figura 5.15</b> – Mudança temporal na composição da cobertura do solo no Distrito Federal. Própria autoria, 2018.....	145
<b>Figura 5.16</b> – Mapa de sobreposição dos potenciais de recarga dos aquíferos, área urbanizada em 2016 e limites das Unidades Hidrográficas do Distrito Federal. Própria autoria, 2018.....	148

<b>Figura 5.17</b> - Coberturas urbana, vegetal e outras da Unidade Hidrográfica Lago Paranoá em 2016. Própria autoria, 2018.....	149
<b>Figura 5.18</b> – Distribuição das zonas homogêneas de densidade construtiva na UH do Lago Paranoá. Própria autoria, 2018. ....	154
<b>Figura 5.19</b> – Organograma dos elementos e critérios de análise das tipologias urbanas identificadas na UH do Paranoá. Própria autoria, 2018.....	155
<b>Figura 5.20</b> – Imagens para visualização dos dados levantados para a análise das tipologias urbanas da UH do Lago Paranoá. Própria autoria, 2018.....	156

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1</b> – Balanço hídrica em áreas urbanas e áreas naturais por diferentes estudos. Própria autoria, 2017.....	25
<b>Tabela 1.2</b> – Quadro com os principais serviços gerados pelo ciclo hidrológico. Adaptado de Postel e Carpenter (1997).....	29
<b>Tabela 1.3</b> – Ecossistemas e seus serviços gerados localmente. Com base em BOLUND e HUNHAMMAR (1999), p.299.....	<i>Erro! Indicador não definido.</i> 31
<b>Tabela 2.1</b> – Critérios de avaliação do meio físico relacionados a recargados aquíferos. Própria autoria, 2018.....	44
<b>Tabela 2.2</b> – Relação entre o tipo de solo e o grau de inclinação viável para ocupação de encostas. Fonte: (TANDY, 1972, p. 203) .....	47
<b>Tabela 2.3</b> – Relação entre os fatores do meio físico propícios a recarga de aquíferos e propícios a urbanização. Fonte: Própria autoria, 2018.....	48
<b>Tabela 3.1</b> – Valores de coeficiente de escoamento (C), conforme cenários de urbanização da bacia. Fonte: WILKEN, 1978 apud. GAROTTI; BARBASSA, 2010. ....	56
<b>Tabela 3.2</b> – Valores de CN para áreas urbanas em condição de umidade antecedente e para os quatro tipos hidrológicos de solo .....	61
<b>Tabela 3.3</b> – Apresentação dos resultados do estudo de Rays (1980).....	66
<b>Tabela 3.4</b> – Fatores relacionados com a perda de infiltração natural com da água da chuva nas cidades. Própria autoria, 2018. ....	67
<b>Tabela 3.5</b> – Associação entre diferentes padrões de ocupação residencial e áreas perturbadas num parcelamento de um acre. Própria autoria, 2018, com dados de MCharg; Sutton e Spirm (1973) .....	77
<b>Tabela 3.6</b> – Associação entre diferentes densidades de ocupação urbana e geração de áreas impermeáveis e escoamento superficial. Própria autoria, 2018, com dados de EPA, 2000.....	78
<b>Tabela 3.7</b> – Medidas de avaliação dos elementos configuracionais da forma urbana relevantes ao potencial de infiltração natural das águas das chuvas. Própria autoria, 2018 .....	91
<b>Tabela 4.1</b> – Características hidrológicas dos sistemas aquíferos intergranulares ou rasos do Distrito Federal. Própria autoria, 2018, com dados de GDF, 2017 e Resolução ADASA nº 01, 28/02/2011 .....	96
<b>Tabela 4.2</b> – Características hidrológicas dos sistemas aquíferos profundos do Distrito Federal Própria autoria, 2018, com dados de GDF, 2018 e Resolução ADASA nº 01, 28/02/2011.....	99
<b>Tabela 4.3</b> – Classificação quanto ao potencial de recarga das compartimentações geomorfológicas do Distrito Federal, de acordo com variação de declividade e altitude. Própria autoria, 2018 .....	115

<b>Tabela 4.4</b> – Classificação quanto ao potencial de recarga dos tipos de solo do Distrito Federal, de acordo com variação de condutividade hidráulica e espessura. Própria autoria, 2018.....	116
<b>Tabela 4.5</b> – Áreas e percentuais do território do Distrito Federal que representam as diferentes categorias de potencial de recarga. Própria autoria, 2018 .....	118
<b>Tabela 4.6</b> – Classificação quanto ao potencial de urbanização das compartimentações geomorfológicas do Distrito Federal, de acordo com variação de declividade. Própria autoria, 2018 .....	188
<b>Tabela 4.7</b> – Classificação quanto ao potencial de urbanização dos tipos de solo do Distrito Federal, de acordo com variação resistência a carga, coesão e permeabilidade. Própria autoria, 2018 .....	119
<b>Tabela 4.8</b> – Áreas e percentuais do território do Distrito Federal que representam as diferentes categorias de potencial de urbanização. Própria autoria, 2018 .....	120
<b>Tabela 4.9</b> – Características do meio físico do Distrito Federal relacionadas com o maior potencial de recarga dos aquíferos e com uma maior aptidão a ocupação urbana. Própria autoria, 2018.....	133
<b>Tabela 4.10</b> – Fases de planejamento da ocupação e surgimento dos núcleos urbanos do território do Distrito Federal. Própria autoria, 2018 .....	134
<b>Tabela 5.1</b> – Valores do coeficiente da curva média de infiltração em função da permeabilidade do solo e cenários de urbanização, observados a partir da densidade construtiva, em 5% de declividade .....	149

## **RESUMO**

É inerente ao processo de urbanização a alteração do regime hidrológico, fato que gera desafio à sua gestão em áreas urbanas, dado a impossibilidade de prescindir da água como substrato à vida. Verifica-se, por outro lado, que o tema é secundário às estratégias de planejamento urbano e ordenamento territorial, não sendo corrente o uso de técnicas e normas urbanísticas voltadas a menor perturbação e/ou manutenção do comportamento natural da água nas cidades. Nesse sentido, a pesquisa visa contribuir para essa discussão, se debruçando sobre as relações entre tipologias de ocupação urbana e seus impactos sobre a infiltração natural em áreas de recarga de aquíferos, rumo a um planejamento urbano que auxilie a menor perturbação do ciclo água. Para atingir esse objetivo o desenvolvimento da pesquisa percorreu o entendimento das conexões entre planejamento urbano, sustentabilidade, ecologia e hidrogeologia. Como contribuição para construção de um planejamento urbano sensível à água, constata: (i) a importância da consideração do comportamento natural do ciclo hidrológico, metodologias de planejamento ecológico e a valorização dos serviços ecossistêmicos urbanos; (ii) a relação entre características do meio físico geomorfológico e pedológico que condicionam o processo de recarga e, também, o processo de urbanização; (iii) a identificação dos três principais fatores dificultadores da infiltração natural de água em áreas urbanas, a saber: o selamento, a compactação e o desmatamento do solo; e (iv) a consolidação de estrutura teórico metodológica, que identificou elementos configuracionais urbanos (sistema viário, espaços livres públicos e lotes) para caracterização e avaliação da oportunidade de infiltração natural gerada por diferentes tipologias urbanas. Esses princípios foram verificados a partir do estudo dessas relações sobre o território do Distrito Federal e na Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá.

**PALAVRAS-CHAVE:** Planejamento urbano ecológico; Recarga de aquíferos; Condicionantes físicos da urbanização; Infiltração natural na cidade; Tipologias urbanas sensíveis a água.

## **SUMMARY**

Changes to the hydrological regime are inherent to the urbanization process. This creates a challenge to this hydrological management in urban areas, given the impossibility of replacing water as a part of life. Nevertheless, this theme is secondary to the urban and land use planning strategies. It is uncommon to see urban techniques or regulations which aim at the reduction of impacts on the usual behavior of water in the cities or this behavior maintenance. In this sense, this research aims to contribute to this discussion, analyzing the relations between urban occupation typologies and their impacts on the natural behavior of water infiltration in aquifers' areas. This hopefully will lead to urban planning which contributes to smaller perturbations in the water cycle. To reach this goal, this research analyzed the connections between urban planning, sustainability, ecology and hydro-geology. To contribute to the construction of an urban planning sensible to water, we verify: (i) the importance of taking into account the behavior of the natural hydrological cycle, methodologies for ecological planning and the appreciation of urban ecosystem services; (ii) the relation between the characteristics of the physical geomorphological and pedological environment, which condition the recharge process and, also, the urbanization process; (iii) the identification of the three main factors which hinder the natural infiltration of the water in urban areas: the sealing, compaction and deforestation of the soil; (iv) the consolidation of a theoretical methodological structure, which identified urban configurational elements (the road system, public free spaces and urban lots) to characterize and evaluate the natural infiltration opportunity created by different urban typologies. These principles were verified through a study of these relations on the territory of the Distrito Federal and the Hydrographical Area of the Paranoá Lake.

**KEYWORDS:** Ecology and urban planning; Aquifers recharge; Environmental factors for urban planning; Natural infiltration in the city; Water-sensitive urban typologies.

*“Os problemas de abastecimento d’água e disposição dos despejos dos esgotos relacionam-se mais de perto com as condições geográficas do que quaisquer outros em uma área densamente povoada. Ao se escolher um sítio, as três primeiras coisas a se considerarem no planejamento, são abastecimento d’água, drenagem e disposição dos esgotos”*

(Regional Plan of New York and its environments, 1929, p. 3)

## **INTRODUÇÃO**

Adentrando a segunda década do século XXI quase todas as sociedades, em diferentes graus, enfrentam consequências socioambientais derivadas do processo de urbanização, como a poluição do ar, da água e do solo, desmatamento, redução da biodiversidade e mudanças climáticas (GUERRA; CUNHA, 2001; HOGAN et al., 2000). A concentração crescente da população nas cidades e o exercício de suas principais atividades – transporte, fornecimento de energia e água, remoção de resíduos, oferta de serviços e manufatura - demandam grandes quantidades de energia e recursos, gerando grande quantidade de resíduos. A conjuntura ainda é aliada às limitações das administrações públicas em relação ao planejamento e a gestão do uso e ocupação do solo urbano, que acabam por exacerbar esses impactos ambientais.

Em especial, o processo tradicional de urbanização pode trazer impactos quantitativos e qualitativos sobre o regime hidrológico. Por exemplo, em 2011, quarenta e um países estavam em risco de escassez hídrica<sup>1</sup>, sendo que, desses, dez já retiravam mais de 100% da água doce renovável disponível (FAO, [S.d.]). Em particular, os níveis de águas subterrâneas estão em declínio em torno de inúmeras megacidades do mundo (GROUNDWATER GOVERNANCE, [S.d.]), levando a consequências graves, como a intrusão de água salgada nos aquíferos doces e a transformação de rios perenes em rios intermitentes (GLEESON et al., 2012). A disponibilidade de água também é afetada pela poluição, uma vez que a expansão da agricultura industrial, poluentes industriais e águas residuárias, geram cargas excessivas de nitrogênio e fósforo nos rios e aquíferos (WWAP, 2015).

A Organização das Nações Unidas (ONU), em relatório divulgado em 2015, relaciona às ameaças de escassez hídrica à que a sociedade estará sujeita às formas de exploração dos

---

<sup>1</sup> Regiões podem ser definidas como em risco de escassez hídrica a partir da retirada de mais de 25% de seus recursos hídricos renováveis.

recursos hídricos e aos padrões de ocupação do solo. Nesse contexto, é comum o destaque para o impacto causado pelas áreas em urbanização acelerada, mas enfatiza-se como mais realista do que conter a opção humana de viver em cidades, o controle sobre os padrões de urbanização insustentáveis que desequilibram com maior intensidade regime hidrológico.

No Brasil, esse cenário já apresenta manifestações de sua árida realidade. Durante os anos de 2014 e 2016 a cidade de São Paulo, maior centro produtivo e populacional do Brasil, deixou milhões de moradores com as torneiras secas, chegando a utilizar o volume morto de seu principal reservatório, o Sistema Cantareira. Outro importante sistema hidrológico de abastecimento, o do Rio Paraíba do Sul, responsável por abastecer cerca de 9 milhões de pessoas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, também passou por situações de estresse no ano de 2015 (ANA, 2016).

Em concordância com o relatório da ONU, especialistas brasileiros conjecturam que as crises hídricas que vêm ocorrendo no Brasil, têm relação não apenas com a redução da disponibilidade de água devido a variações dos padrões das chuvas, mas também com a falta de planejamento hídrico e gestão territorial de áreas sensíveis a manutenção da quantidade e qualidade da água disponível, como áreas próximas a mananciais, áreas de nascentes e áreas propícias à recarga de aquíferos (CISCATI, 2017; VELOSO, 2017; ZIEGLER, 2015).

A alteração do regime hidrológico leva a alteração de importantes serviços ecossistêmicos essenciais à qualidade de vida e ao desenvolvimento urbano. A água, enquanto recurso natural, realiza cinco funções ecológicas básicas: (1) de substrato à vida, inclusive à vida humana; (2) de fornecimento de insumo ao sistema produtivo; (3) de assimilação de resíduos gerados por diferentes atividades de origem antrópica; (4) de provisão de utilidades estéticas e de lazer; e (5) de elemento essencial para a regulação climática do Planeta, por meio do ciclo hidrológico e da circulação atmosférica global.

Devido, principalmente, à sua função como substrato à vida, sua substituição por qualquer capital artificial é impossível. Assim, a preservação dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, enquanto patrimônio natural e cultural é imperativa. Os recursos hídricos e seus serviços ecossistêmicos apenas são renováveis em condições de estabilidade física, química e biológica do meio, sendo vulneráveis às formas pelas quais outros recursos naturais são explorados, em particular a ocupação do solo, podendo vir a ser bastante impactados por diversas ações antrópicas e por mudanças climáticas (NASCIMENTO; HELLER, 2005).

## **Problema**

Nesse contexto, entender e monitorar os impactos da urbanização relacionados com a quantidade e qualidade da água representam um desafio. Para isso, a noção da promoção do desenvolvimento sustentável tem sido aplicada de forma cada vez mais ampla no debate sobre as cidades e a água. Entretanto, apesar dessa aparente mobilização em promover uma revisão nas formas tradicionais de produzir cidades, persiste ainda uma defasagem nos instrumentos e práticas, que articulem as dimensões da sustentabilidade às políticas urbanas, demandando uma revisão das estratégias de planejamento para começar a lidar de forma eficaz com a gestão das águas no meio urbano (RIBAS, 2003).

Brown, Keath e Wong (2009) destacam, como resultado de uma análise histórica de normas e regulações de planejamento e gestão da água no meio urbano, diferentes estágios de gestão das águas urbanas, a saber: (1) a seguridade do acesso à água; (2) a saúde pública por meio do esgotamento; (3) a mitigação de enchentes por meio da drenagem; (4) a preservação e acesso da população aos corpos d'água, como forma de lazer e proteção ambiental (5) a compreensão dos limites de uso dos recursos hídricos, por meio da abordagem do ciclo da água; e (6) por fim, as infraestruturas multifuncionais que reforçam o comportamento natural da água.

Dessas fases, as três primeiras já foram alcançadas, em maior ou menor grau, pela maioria das cidades (BROWN; KEATH; WONG, 2009); e fazem parte do que se conhece por saneamento ambiental convencional ou higienista, que utiliza infraestruturas monofuncionais para o abastecimento, esgotamento e drenagem urbana. Essa gestão, deu origem a uma lógica de planejamento separada da base ecológica do território, onde corpos d'água eram canalizados, efluentes sem tratamento lançados ao ambiente, áreas de mananciais desmatadas e áreas de especial interesse para a recarga de aquíferos impermeabilizadas.

Como resultado, atualmente as áreas urbanas sofrem desequilíbrios em seus sistemas hídricos, causando enchentes e diminuição da quantidade e qualidade de água. Esse desequilíbrio, trazido pelas três primeiras fases de gestão da água, destacou a importância de se considerar a base ecológica do território no planejamento. Sendo que, desde 1970, estão surgindo novas abordagens de gestão da água no meio urbano, ditas mais sustentáveis, que possuem como características as últimas três fases descritas no estudo de Brown, Keath e Wong (2009), a exemplo de iniciativas como a Low Impact Development – LID, e Water Sustainable Urban Design – WSUD e Sustainable Drainage Systems - SuDS. No Brasil,

segundo Souza, Cruz e Tucci (2012), essas novas abordagens apenas começaram a ser recomendadas em alguns municípios a partir do final dos anos 2000, com o desenvolvimento de um Programa de Drenagem Sustentável por parte do Ministério das Cidades em 2006. Entretanto, sua adoção, quando existente, ainda comparece de forma muito pontual.

A incorporação de técnicas de planejamento ecológico no gerenciamento da água urbana desempenha um avanço no alcance da sustentabilidade, por que o planejamento ecológico leva em consideração o equilíbrio entre as formas de ocupação do território e dos sistemas que as sustentam, podendo criar uma ponte entre o planejamento urbano e a gestão de água (ELMQVIST et al., 2014; IMPERIAL, 1999; SLOCOMBE, 1993; WWAP, 2015). Em especial, a abordagem dos serviços ecossistêmicos (SE), tem potencial para redefinir as perspectivas sobre as relações homem-natureza em direção a uma visão mais holística que destaca não só nossa dependência e responsabilidade por ecossistemas saudáveis, mas também o valor econômico dos mesmos.

Entretanto, para que seja possível alcançar um planejamento ecológico da água no meio urbano, é necessário ocorrer avanços na interface entre os serviços de: (i) saneamento ambiental, que trata da evacuação e tratamento dos resíduos sólidos e líquidos gerados na cidade; (ii) do planejamento urbano, que trata do ordenamento da cidade; e (iii) da gestão de recursos hídricos, que trata das atividades de aproveitamento, conservação, proteção e recuperação da água bruta, em quantidade e qualidade (NASCIMENTO; HELLER, 2005; BRITO; BARRAQUÉ, 2008).

Entretanto têm sido pouco os estudos e esforços práticos que articulam suas interdependências, que são muitas. Em especial o planejamento urbano leva pouco em consideração seu impacto sobre a qualidade e quantidade da água no meio urbano e sua relação com esses outros serviços. Assim, como destaque do problema a ser estudado se coloca a questão de como pensar o uso e ocupação do solo urbano não só como demandador de água e gerador de impactos negativos para o sistema hídrico, mas como parte da solução de gestão da água no meio urbano, delineando as interfaces entre ocupação do solo urbano e garantia da quantidade e qualidade de água.

A importância do estudo da relação forma urbana-impacto hídrico, se deve a evidências de que as mudanças dos padrões de cobertura do solo, devido à conversão de áreas naturais em áreas agrícolas e áreas urbanizadas, amplamente impermeabilizadas e desvegetadas, são a principal característica que altera diversas funções do ciclo hidrológico

natural, como a função de recarga, a evapotranspiração e o escoamento superficial (KRAMER, 2013; TANG et al., 2005).

Nesse processo, chama a atenção, principalmente, a função de recarga dos aquíferos, devido: (i) uma notada semelhança entre as áreas propícias à recarga e as áreas propícias a urbanização; e (ii) o destaque que adquire os padrões de ocupação do solo para a manutenção das águas subterrâneas, devido a diminuição da infiltração natural. Ainda, o processo de recarga merece destaque devido aos cenários de escassez hídrica relatados, onde os reservatórios de água subterrânea possuem um papel estratégico de amortecedor para compensar os períodos de aridez, auxiliando na manutenção da quantidade de água superficial e no funcionamento do ecossistema.

A incerteza quanto à disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos e suas taxas de reabastecimento representam um sério desafio à gestão sustentável da água no meio urbano. Sendo importante, para contribuir com esse campo, identificar como diferentes formas de ocupação urbana se relacionam com a função de recarga dos aquíferos, já que as cidades são compostas por diferentes padrões de ocupação, que podem ser mais ou menos propícios a infiltração da água no solo ou a aplicação de infraestruturas de saneamento multifuncionais que reforçam o comportamento natural da água, levando à uma maior ou menor perda de recarga dos aquíferos.

Existe uma quantidade significativa de estudos, principalmente na área de hidrogeologia, que procuram entender os processos que envolvem a recarga dos aquíferos, as suas taxas e espacialização desse processo no território, a exemplo de: Simmers (1987); Teixeira et al. (2000); Campos (2004); Lousada e Campos (2005); Gonçalves (2012, 2007); Bear (2007); Souza (2013); Santos e Koide (2016). Também, vários estudos e abordagens, procuram estabelecer diretrizes de urbanização mais sensíveis ao ciclo hidrológico, priorizando a infiltração natural das águas e a utilização de técnicas de drenagem sustentável, a exemplo de: McHarg, Sutton e Spirm (1973); Urbonas (1994); EPA (2000); Andjelkovic (2001); Hinman (2012); Nunes (2012); Souza, Cruz e Tucci (2012); Andrade (2014); Melbourne Water (2014); Ballard (2015); WWAP (2018). Entretanto ainda é muito reduzido o número de estudos que procura relacionar a recarga dos aquíferos e as tipologias de ocupação urbana (MARSALEK et al., 2013), desafio com o qual essa pesquisa pretende contribuir.

## **A Premissa**

A problemática acima referida se embasa nas premissas que: (1) existe semelhanças entre as áreas propícias à recarga e as áreas propícias a urbanização; (2) diferentes tipologias de ocupação do solo urbano geram diferentes oportunidades de infiltração natural de água no solo, gerando diferentes impactos sobre a recarga dos aquíferos; e (3) o conhecimento da potencialização ou minimização da infiltração natural produzidas por essas tipologias associado ao conhecimento das condições do meio físico que regulam a dinâmica da recarga, se constituem em condição para a predição de padrões de ocupação que mitiguem a perda de recarga dos aquíferos em áreas urbanas.

## **Objetivo**

Diante do problema e premissa apontados esta pesquisa tem o objetivo de, a partir de uma revisão dos temas referentes a ecologia urbana, hidrogeologia e morfologia urbana, construir um arcabouço teórico/metodológico capaz de auxiliar na identificação e classificação de diferentes tipologias urbanas de ocupação urbana quanto a oportunidade que geram para a infiltração natural da água e sua relação com áreas de recarga dos aquíferos, com o intuito de contribuir para a construção de um planejamento urbano sensível à manutenção da função de recarga dos aquíferos.

## **Objetivos específicos:**

- 1) Estabelecer as contribuições da ecologia urbana para o planejamento urbano sensível à manutenção da função de recarga dos aquíferos.
- 2) Identificar as características e conhecer as relações funcionais entre as áreas propícias a recarga dos aquíferos e as áreas propícias a urbanização.
- 3) Identificar os elementos configuracionais urbanos e suas características que geram maior ou menor oportunidade para infiltração natural da água no solo.
- 4) Identificar e classificar tipologias de ocupação urbana e suas diferentes oportunidades geradas para infiltração natural, relacionando-as com as áreas de recarga dos aquíferos no estudo de caso.

## **Procedimentos metodológicos**

Visando entender o problema, verificar as premissas e atingir os objetivos propostos a pesquisa se organiza em três procedimentos metodológicos: (1) a exploração, por meio de revisão bibliográfica, dos conceitos sobre a sustentabilidade, ecologia urbana, recarga de aquíferos, infiltração natural e técnicas de urbanização sensível à água, com o intuito de obter conhecimento a respeito da relação forma urbana - impacto na recarga dos aquíferos e construir um arcabouço teórico/metodológico capaz de contribuir para um planejamento urbano sensível a função de recarga dos aquíferos; (2) o desenvolvimento e aplicação do arcabouço teórico/metodológico, construído na primeira parte, na análise do estudo de caso, verificando com isso sua aplicação e as premissas do trabalho; (3) apresentação das principais limitações, conclusões e análises complementares da pesquisa e recomendações para estudos futuros.

O primeiro procedimento metodológico da pesquisa, que envolve a construção do arcabouço teórico/metodológico, se desdobra em dez passos metodológicos:

- 1.1. Revisão dos textos de Acselrad (1999), Tudela (1996), Sachs (2002), Ribas (2003), Palsule (2004), Veiga (2005), Batistela (2007), Christen e Schmidt (2012), Kates (2012), Wu (2014) e McPhearson et al. (2016) para identificar as principais contribuições dos conceitos da ecologia e sustentabilidade urbana para o planejamento urbano sensível à recarga, a saber um maior entendimento sobre: os ciclos naturais; a relação entre os padrões espaciais ecológicos, físicos e socioeconômicos; e os serviços ecossistêmicos e seus valores.
- 1.2. Revisão dos textos de Carvalho e Bastista da Silva (2006), Marsalek et al. (2013) e Benini e Mediondo (2015) para explorar o funcionamento do ciclo hidrológico natural e as principais alterações em seu balanço hídrico trazidas pela urbanização.
- 1.3. Revisão dos textos de Angus Hills (1961), Philip Lewis (1963), Ian McHarg (1969) e Meneguetti (2007) para compreender as metodologias de planejamento ecológico que permitem a identificação de padrões espaciais que podem contemplar aspectos do uso e ocupação do solo, aspectos do meio ambiente e aspectos socioeconômicos de forma que possam ser posteriormente empregadas na análise.
- 1.4. Revisão dos textos de Postel e Carpenter (1997), Bolund e Hunhammar (1999), MEA (2003), TEEB (2011), Tôsto, Pereira e Mangabeira (2012), Gómez-

Baggethun e Barton (2013), McPhearon, Hamstead e Kremer (2014), McPhearon et al. (2015) para compreender e dispor o significado, papel e tipos de serviços ecossistêmicos urbanos ligados ao ciclo da água e a recarga dos aquíferos.

- 1.5. Revisão dos textos de Simmers (1987), Teixeira et al. (2000), Campos (2004), Bear (2007) e Silveira e Usunoff (2009) para entender o processo de recarga e os principais serviços ecossistêmicos relacionados com essa função e organizar as características do meio físico relacionadas com a ocorrência do processo, de forma que seja possível verificar suas áreas de ocorrência.
- 1.6. Revisão dos textos de McHarg (1969), Mota (1981), Landsberg (1981), Hough (1984), Barbirato, Almeida (2004) e Torres e Souza (2011) para organizar as características do meio físico que condicionam o processo de recarga, de forma que seja possível verificar as áreas mais propícias para sua ocorrência e relacioná-las com as áreas de ocorrência de recarga dos aquíferos.
- 1.7. Revisão dos textos de Foster, Morris e Lawrence (1994), Foster et al. (1998), Marsalek et al. (2013), Prince Georges County (2000) e Hinam (2012) e Souza et al. (2012) para dispor as principais alterações na quantidade e qualidade de água subterrânea causadas pelo processo de urbanização sobre áreas de recarga e sua relação com os serviços ecossistêmicos prestados por essa função.
- 1.8. Revisão dos textos de Kays (1980) Booth (1991), Foster, Morris e Lawrence (1994), Arnold e Gibbons (1996), Hamilton e Waddington (1999) Maksimovic e Tucci (2001), Andjelkovic (2001), Shuster et al. (2005), Marsalek et al. (2006), Gregory et al. (2006), Pitt et al. (1999, 2003, 2009), Jacobson (2011) e Amaral (2015) para sistematizar principais alterações causadas pela urbanização na taxa máxima possível de entrada da água no solo, a saber: selamento, compactação e desmatamento do solo.
- 1.9. Revisão dos textos de McHarg, Sutton e Spirn (1973), Schueler (1987), Urbonas (1994), EPA (2000), Prince Georges County (2000), Maksimovic e Tucci (2001), Andjelkovic (2001), Kiama Municipal Council (2005), Hinam (2012), Nunes et al. (2012), Souza Cruz e Tucci (2012), Melbourne Water (2014), Andrade (2014), Ballard et al. (2015) e WWAP (2018) para organizar diferentes estratégias de urbanização voltadas a mitigação da perda infiltração natural de água da chuva em

relação as principais alterações causadas pela urbanização e o local onde elas ocorrem.

- 1.10. Revisão dos textos de Rossi (2001), Lamas (2004), Bettencourt (2010) e Panerai (2014) para identificar os elementos configuracionais da forma urbana que possuem maior impacto sobre o processo de recarga dos aquíferos e propor uma sistematização de suas características a partir das informações organizadas nos passos 1.8 e 1.9, a partir das quais pode-se identificar tipologias urbanas semelhantes quanto a oportunidade gerada para a infiltração natural da água nos aquíferos.

A partir desses passos é construído o arcabouço teórico/metodológico da pesquisa capaz de contribuir para um planejamento urbano sensível a função de recarga dos aquíferos a partir de três etapas: emprego dos ensinamentos dos ensinamentos trazidos pelos conceitos de sustentabilidade e ecologia urbana; identificação das áreas propícias a recarga e a urbanização; e identificação da oportunidade para infiltração natural da água trazida pelas tipologias de ocupação urbana presentes nas áreas urbanizadas sobre áreas de recarga.

Para o segundo procedimento metodológico, que envolve o desenvolvimento e aplicação do arcabouço teórico/metodológico na análise de uma área urbanizada sobre área de recarga de aquíferos, escolheu-se como estudo de caso o Distrito Federal (DF). O DF foi escolhido devido à problemática recente que tem vivido em relação à escassez de água, o que torna o momento importante para uma revisão do papel do planejamento urbano na gestão da água nesse território; seu alto grau de urbanização, que coloca a relação forma urbana – impacto na recarga em evidência; e devido a substancial base de informações e debates sobre a dinâmica socioambiental do território dada pelo recente estudo do zoneamento ecológico econômico e urbano realizado pela Secretária de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal - SEMA. Esse procedimento se desdobra em oito passos metodológicos:

- 2.1. Caracterização dos aquíferos do Distrito Federal e dos serviços ecossistêmicos prestados pelos mesmos no território a partir de dados de Campos (2004), Gonçalves (2007), GDF (2017), Adasa (2011) e Souza (2013).
- 2.2. Identificação dos fatores do meio físico que tornam as áreas propícias a recarga e urbanização no território do Distrito Federal a partir de dados de GDF e Greentec (2011), Gonçalves (2007) e Souza (2013) e ABNT NBR 15520.

- 2.3. Construção dos mapas de áreas propícias a recarga de aquíferos e urbanização, em sistema de informação geográfica com o programa ArcGis, utilizando metodologia de sobreposição de padrões espaciais com características do meio físico semelhantes com pesos atribuídos de acordo com sua aptidão para o fenômeno estudado, também utilizada por McHarg (1979) e GDF (2017).
- 2.4. Revisão do processo de decisão de ocupação urbana do território do Distrito Federal a partir das informações e zoneamento dos: estudos e planos de ordenamento territorial do Distrito Federal – Relatório Cruls - 1895, Relatório Belcher - 1955, Projeto Urbanístico do Plano Piloto - 1957, Plano Diretor de Águas, Esgotos e Controle da Poluição – PLANIDRO/1970, Plano Estrutural de Ordenamento Territorial – PEOT/1977, Brasília Revisitada – 1987, Plano de Uso e Ocupação do Solo – POUISO/1986 e Plano Diretor de Ordenamento Territorial – PDOT/92-97-09-12; e da identificação das áreas urbanizadas nas fotos áreas dos anos de 1964, 1986, 1991, 1997, 2009 realizadas pelo Sistema de Informações Territoriais e Urbanas – Siturb/DF e das área urbanizada na foto área de 2016, identificadas pela autora de forma visual a partir do levantamento de 2015 do Siturb. Essas informações foram cruzadas com o mapa de áreas propícias a recarga, construído no passo anterior, em sistema de informação geográfica com o programa ArcGis, para verificar a consideração das mesmas na tomada de decisão.
- 2.5. Identificação da situação geral do processo temporal de alteração da cobertura do solo sobre as áreas de recarga do Distrito Federal, considerando além das áreas urbanizadas “outras” áreas como as com ocupações agropecuárias, de mineração e de chácaras, para se ter entendimento do total de áreas de recarga ainda cobertas por vegetação nativa ou reflorestada. Para realizar a análise foram utilizados, em sistema de informação geográfica com o programa ArcGis, dados: da área urbanizada dos anos de 1964, 1975, 1986, 1991, 1997, 2004, 2009 e 2015 do Siturb e de 2016 de própria autoria; dados da cobertura vegetal nativa, reflorestada e “outras” coberturas dos anos de 1984, 1986, 1991, 1997, 2004, 2009, 2015 e 2016 desenvolvidos pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal – Codeplan (NEVES et al., 2016) e de 1953 desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura – Unesco (VERÍSSIMO, 2002).

- 2.6. Seleção de Unidade Hidrográfica com maior área urbanizada sobre áreas de recarga de aquíferos para análise mais detalhada da oportunidade de infiltração natural de diferentes tipologias urbanas existentes. A análise se deu a partir do levantamento da área urbanizada de 2016 de própria autoria, limites das unidades hidrográficas do Distrito Federal da SEMA e mapa de áreas propícias a recarga, de própria autoria, em sistema de informação geográfica com o programa ArcGis.
- 2.7. Identificação de forma visual, em sistema de informação geográfica com o programa ArcGis, de áreas de densidade construtiva homogênea e de tipologias semelhantes quanto a oportunidade de infiltração natural dentro da Unidade Hidrográfica selecionada no passo anterior.
- 2.8. Caracterização e classificação das tipologias identificadas no passo anterior de acordo com as características identificadas como de maior impacto sobre o processo de recarga dos aquíferos no passo 1.10. Para isso foram utilizados dados: da área do sistema viário, construídos pela própria autora a partir do shape de vias do Siturb; de lotes e construções da restituição de 2016 do Siturb; da cobertura arbustiva de 2016 da Codeplan e SEGETH; e das áreas gramadas e com solo exposto, desenvolvidos pela autora a partir da leitura de imagem de aerofotogrametria de 2016.

Por fim, o conteúdo dos procedimentos metodológicos de fundamentação teórica, desenvolvimento da metodologia e análise do estudo de caso foram avaliados com o intuito de apontar as principais conclusões da pesquisa e limitações resultantes da disponibilidade de dados e tecnologia, assim como recomendações para estudos futuros.

### **Estrutura da Pesquisa**

A primeira parte da pesquisa, destinada a fundamentação teórica, divide-se em três capítulos. O primeiro capítulo, denominado “Bases da Sustentabilidade e Ecologia para um Planejamento Urbano que Reforça o Comportamento Natural da Água”, investiga a relação entre sustentabilidade urbana e ecologia urbana de forma a fundamentar como ordenamento do território urbano baseado nesses conceitos contribui para a gestão sustentável das águas na cidade. Esse capítulo abrange os passos metodológicos 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4.

O segundo capítulo, denominado “Relações entre o processo de recarga dos aquíferos e o processo de urbanização”, revisa definições básicas relacionadas a formação dos aquíferos e suas funções ecossistêmicas de forma a aprender o processo de recarga e as implicações de sua alteração, assim como as características que definem suas áreas de ocorrências naturais. Também identifica as características do meio físico propícias a urbanização e sua relação com as áreas de ocorrência natural da recarga, assim como as implicações causadas pela ocupação do solo urbano na quantidade e qualidade da água nos aquíferos. Esse capítulo abrange os passos metodológicos 1.5, 1.6 e 1.7.

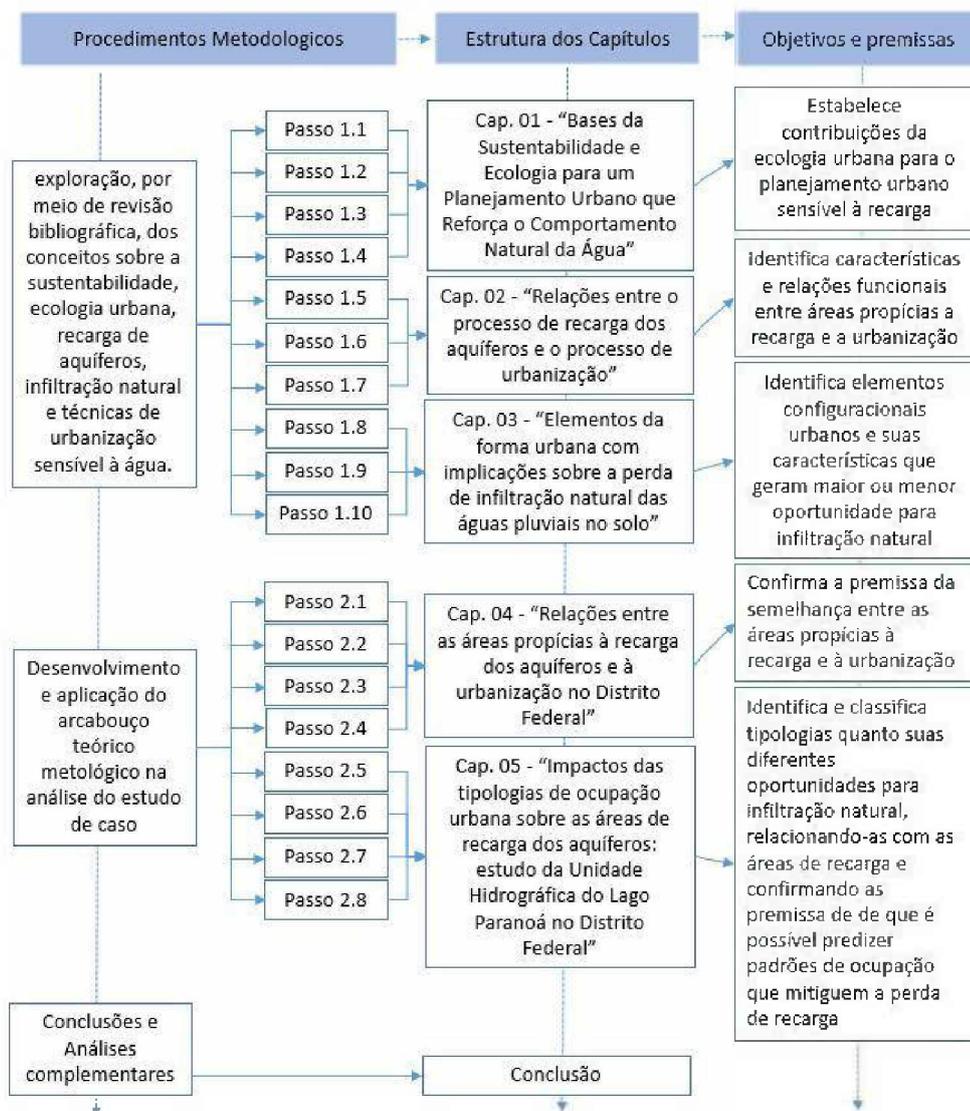
O terceiro capítulo, denominado “Elementos da forma urbana com implicações sobre a perda de infiltração natural das águas pluviais no solo”, revisa e organiza os principais fatores do processo de urbanização relacionados a perda de infiltração natural e as medidas de urbanização sensíveis ao ciclo da água relacionadas com esses fatores. Ainda, a partir da revisão de conceitos da morfologia urbana, identifica os principais elementos configuracionais da forma urbana relacionados com o fenômeno estudado e suas características de maior impacto a recarga, construindo um quadro que pode ser utilizado na identificação de tipologias de similar oportunidade para infiltração natural da água. Esse capítulo abrange os passos metodológicos 1.8, 1.9 e 1.10.

A parte dois, se destina ao desenvolvimento do estudo empírico com aplicação de técnicas e conceitos aprendidos na fundamentação teórica na análise do estudo de caso, e divide-se em dois capítulos. O capítulo 4, denominado “Relações entre as áreas propícias à recarga dos aquíferos e à urbanização no Distrito Federal”, foi desenvolvido principalmente com base nos conceitos organizados no capítulo 2. Caracterizou-se os aquíferos e meio físico do. Com base nos dados coletados se constrói os mapas de áreas propícias a recarga e urbanização. É explorado também o histórico de ocupação urbana do território com base nos planos e estudos de ordenamento territorial, apontando a relação entre o processo de decisão da ocupação urbana e as áreas de recarga dos aquíferos. Esse capítulo abrange os passos metodológicos 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

O capítulo 5, denominado “Impactos das tipologias de ocupação urbana sobre as áreas de recarga dos aquíferos: estudo da Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá no Distrito Federal”, foi desenvolvido principalmente com base nos conceitos organizados no capítulo 3. Esse capítulo analisa os padrões de alterações da cobertura do solo no território do Distrito Federal, com ênfase na alteração da cobertura do solo derivada da urbanização, no âmbito de

todo o Distrito Federal, para compreender de forma mais abrangente os impactos das decisões de planejamento discutidas no capítulo anterior. Em seguida são analisadas em maior detalhe diferentes tipologias de ocupação urbana quanto ao seu impacto na recarga natural dos aquíferos, no âmbito da Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá, como forma de aprofundar o entendimento da correlação entre os parâmetros urbanísticos com influência sobre a infiltração natural da água discutidos no capítulo 3. Esse capítulo abrange os passos metodológicos 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.

Por fim, na terceira e última parte, serão apontadas as principais conclusões, contribuições e limitações do trabalho, assim como possíveis trabalhos futuros para aprofundar o entendimento da problemática do trabalho: como o planejamento urbano pode auxiliar na gestão sustentável da recarga dos aquíferos em áreas urbanas.



**Figura 1 - Organização da pesquisa. Própria autoria, 2018.**

## **CAPÍTULO 01**

### **Bases da Sustentabilidade e Ecologia para um Planejamento Urbano Sensível a Água**

Esse capítulo investiga a conceituação teórica de dois termos importantes para integração do planejamento urbano às novas abordagens sustentáveis de manejo da água abordadas na introdução: (1) a sustentabilidade urbana; e (2) a ecologia urbana. Explorando, principalmente, como esses conceitos contribuem com o planejamento urbano, para auxiliar na manutenção do comportamento natural da água.

Para isso, o capítulo se divide em duas partes: (1) uma trata da conceituação dos termos sustentabilidade urbana e ecologia urbana e das principais contribuições que eles podem trazer ao planejamento urbano voltado ao reforço do comportamento natural da água; (2) outra trata em maior detalhes as contribuições constatadas, no que se refere a: (i) impactos da urbanização sobre o regime hidrológico, (ii) metodologias de planejamento ecológico para uma abordagem holística entre os padrões espaciais e as características do meio físico e (iii) funções ecossistêmicas relacionadas a manutenção das características naturais do regime hidrológico.

#### **1.1. Noções de sustentabilidade e ecologia urbana**

##### **1.1.1. Sustentabilidade e ecologia**

Desde a década de 1990, a noção de sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável, tem sido aplicada de forma cada vez mais ampla nos debates acadêmicos, políticos e culturais. Para autores como Palsule (2004) e Harrison (1992), o atual foco nessa noção pertence à uma revolução cultural que estamos experienciando onde a solidariedade entre a natureza, o homem e as gerações futuras, o respeito às diferenças culturais, éticas e o compromisso com redução de desigualdades socioeconômicas passam a fazer parte dos discursos políticos, acadêmicos e da sociedade.

O ponto de inflexão na alteração de paradigma dessa revolução, se dá principalmente na relação entre sociedade e natureza. Nesse contexto, o entendimento de que não só as atividades humanas afetam a natureza, mas que também somos afetados por essas mudanças, gerou uma nova forma de sentir, pensar e valorar nossa relação com o meio ambiente.

Até aproximadamente o fim século XVII, havia um temor reverencial em relação a natureza, que era vista como inacessível e ao mesmo tempo sublime, fronteira entre inabitável e habitado, cidade e selva (PALSULE, 2004; BATISTELA, 2007). Com os avanços da Revolução Industrial a natureza passou a ser vista como algo a ser conquistado, por meio da utilização de seus recursos naturais e, ao mesmo tempo, algo desejável, dada à deterioração do ambiente urbano, havendo enfoques conservacionistas que prevaleceram até a década de 1970 (RIBAS, 2003). Entretanto, abordagens que investigam os limites da exploração da natureza, e entendem que para a continuação do desenvolvimento seria necessário uma relação de simbiose entre social, econômico e ambiental<sup>2</sup>, vem alterando esses enfoques apenas conservacionistas, para o enfoque no desenvolvimento sustentável (PALSULE, 2004).

Esse conceito surgiu primeiramente na ecologia, quando no século XVI, o uso da madeira era tão intenso que as florestas começaram a escassear, até que na Alemanha começou-se estudos para o uso racional das florestas, até o limite em que elas pudessem se regenerar de forma permanente, surgindo a palavra alemã *nachhaltigkeit*, que significa sustentabilidade (BOFF, 2017).

Por ter nascido dentro do campo da ecologia, esse conceito sofre grande influência dessa ciência. Haeckel (1866), um dos primeiros autores do campo, definiu ecologia como o estudo dos ecossistemas, das relações entre o organismo e o mundo externo circunvizinho, que constituem redes dentro de redes, constatando que na natureza não há hierarquias bem definidas, apenas redes aninhadas. Ainda, ecossistemas são definidos como sistemas abertos que incluem todos os organismos vivos presentes em determinada área e suas características físicas, químicas e biológicas com os quais os organismos interagem (COSTA, 2008).

Entretanto, os debates que levaram o conceito da sustentabilidade a ter o alcance atual têm sido associados a matrizes discursivas de meados da década de 1970. Desde o alerta do Relatório Meadows, apresentado ao Clube de Roma, em 1972, que encontrou eco na

---

<sup>2</sup> As dimensões social, econômica e ambiental são as mais comumente associadas ao desenvolvimento sustentável, entretanto alguns autores, como Ignacy Sachs, veem na verdade cinco dimensões no desenvolvimento sustentável: social, econômica, ecológica/ambiental, espacial e cultural. Ver SACHS, 1993, p. 37

Conferência de Estocolmo, em 1972, e foi crescendo no pensamento científico e político até as várias rodadas de debates e publicações da Comissão Brundtland, em 1987, que levou o mundo a se reunir na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, no Rio de Janeiro.

Embora esse percurso tenha levado a existência de um consenso sobre o papel da noção de sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável como novo modelo que guia o desenvolvimento da sociedade e sua relação com a natureza, não há um consenso sobre seus

MATRIZES DISCURSIVAS ASSOCIADAS COM O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	
Os limites do crescimento <sup>1</sup>	1 9 7 2 Esse livro foi o resultado de uma encomenda do clube de Roma, instituição fundada em 1966, com o intuito de debater assuntos relacionados à política, economia e, sobretudo, ao meio ambiente. Foi publicado em 1972 por um grupo de pesquisadores do MIT, liderado por Donella Meadows, que utilizando modelos computacionais demonstram que o consumo e crescimento populacional estão levando a sociedade para além de seus limites ecológicos. Embora alguns resultados controversos, influenciou o pensamento científico e social desde então e inaugurou a era ambientalista ou sustentável.
Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano ou Conferência de Estocolmo	1 9 7 2 A conferência de Estocolmo teve como resultado um manifesto ambiental com 19 princípios, que tinham o objetivo de inspirar os povos para a preservação e a melhoria do ambiente humano e marcou o início da agenda ambiental, reconhecida internacionalmente.
Relatório Brundtland	1 9 8 7 Em 1983, a médica Gro Harlem Brundtland, foi convidada para presidir a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, onde em 1987, publicou um relatório intitulado "Nosso Futuro Comum" que trouxe o conceito de desenvolvimento sustentável para o discurso público
Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento ou Eco-92	1 9 9 2 As amplas recomendações feitas pela Comissão de Brundtland, levaram a realização de nova Conferência em 1992 na cidade do Rio de Janeiro, que deu origem a Agenda 21.

Figura 1.1 — Matrizes discursivas associadas com a construção da noção de desenvolvimento sustentável. Fonte: Própria autoria, 2017.

significados objetivos (CHRISTEN; SCHMIDT, 2012). À vista disso, pode-se dizer que o conceito de sustentabilidade está submetido à lógica das práticas que o discurso pretende tornar realidade objetiva, ao contrário de conceitos analíticos, de contornos definidos e voltados para a explicação do real (ACSELRAD, 1999). Já que, hoje, antes de ser uma referência consolidada de padrões de relação entre conservação ambiental e crescimento econômico, a sustentabilidade é: um processo em permanente construção que se articula aos efeitos socioambientais desejados pela sociedade; um campo de batalha simbólico de legitimação de práticas e atores sociais; e uma poderosa ferramenta de marketing.

Dentro da comunidade científica, há um entendimento de que esse ainda é um conceito em amadurecimento, mas nem por isso de pouca utilidade como visão de futuro que alicerça diferentes ideias (ACSELRAD, 1999; SACHS,

2002; VEIGA, 2005; CHRISTEN; SCHMIDT, 2012). Os estudos acadêmicos dessa noção começaram a se aprofundar principalmente nos anos 2000, quando começaram a surgir vários programas de pesquisa multidisciplinar e redes independentes de cientistas que pesquisavam o tema, levando ao surgimento de um novo campo, a ciência da sustentabilidade (CHRISTEN; SCHMIDT, 2012; KATES, 2012).

Segundo Kates (2012) esse novo campo de pesquisa investiga as interações entre sistemas naturais (geologia, ecologia, climatologia, etc.) e sociais (economia, geografia, planejamento urbano) e em como essas interações afetam o desafio da sustentabilidade; podendo se dividir em quatro subprogramas: (1) o de foco biológico, enfatizando os destinos entrelaçados da humanidade e a base de recursos naturais sobre a qual essa depende; (2) o de foco geofísico, enfatizando o sistema de interconexões entre o clima e os ciclos biogeoquímicos da terra, incluindo respostas a perturbações por atividades humanas; (3) o de foco social, enfatizando relações entre instituições humanas, sistemas econômicos e culturais, desigualdades sociais e interações entre sociedade e meio ambiente; e (4) de foco tecnológico, concentrado em desenvolver dispositivos e sistemas que gerem menos impactos ambientais.

E, assim como, o campo da sustentabilidade foi influenciado pelo da ecologia, o caminho inverso também é verdade. Sendo que o campo da ecologia expandiu seu enfoque para além do estudo das interações entre apenas o meio natural, incluindo interações sociais e econômicas em suas análises.

### **1.1.2. Sustentabilidade urbana e ecologia urbana**

Dentro dos debates sobre sustentabilidade, o desenvolvimento das cidades de forma sustentável possui um papel preponderante, dada a concentração de população e a influência desse espaço no consumo de recursos e geração de resíduos global.

Assim como em outras áreas, o debate da sustentabilidade nas cidades gerou várias articulações lógicas. Segundo Acselrad (1999) existem, em particular, três representações distintas da cidade dita sustentável: (1) uma primeira, associa a transição para a sustentabilidade à reprodução adaptativa das estruturas urbanas, com foco no ajustamento das bases técnicas das cidades, a partir de modelos de racionalidade eco energética ou de metabolismo fechado, que se baseia no subprograma da ciência da sustentabilidade de foco nos ciclos biogeoquímicos; (2) uma segunda, a matriz técnica da cidade é pensada por razões

de “qualidade de vida”, notadamente no que se refere às implicações sanitárias, de cidadania e patrimônio, enquanto identidade e cultura, que possui um foco social; (3) uma terceira, que busca a reconstituição da legitimidade das políticas urbanas, tanto para garantir uma eficiência na administração dos recursos públicos, como para democratizar o acesso aos serviços, que vem tomando um foco tecnológico.

Ainda, Tudela (1996) afirma que o paradigma do desenvolvimento sustentável amplia as concepções tradicionais do processo de urbanização em três planos: (1) no plano conceitual, os enfoques urbanos se ampliam para avaliação da sustentabilidade em relações entre componentes que pertencem a diversos domínios, como os da realidade física, ecológica, produtiva e sociocultural, esbarrando no desafio da transdisciplinaridade; (2) no plano espacial, contribuiu para ampliar o alcance das cidades, a ponto de alguns casos alcançarem dimensões planetárias; (3) no plano temporal, implica na consideração dos interesses das gerações futuras, ampliando a dimensão temporal de análise. Muitas vezes essas ampliações transcendem os alcances habituais de diversos âmbitos de conhecimento do planejamento urbano.

O tema da pesquisa, que se refere a contribuição da ocupação urbana para a manutenção dos ciclos biogeoquímicos da água no meio urbano, possui maior relação com a primeira articulação lógica exposta por Acsehrad (1999) e com a ampliação do plano conceitual de Tudela (1996), que envolve o ajustamento das bases técnicas das cidades, envolvendo componentes de outros domínios, como o hidrogeológico, geomorfológico e pedológico.

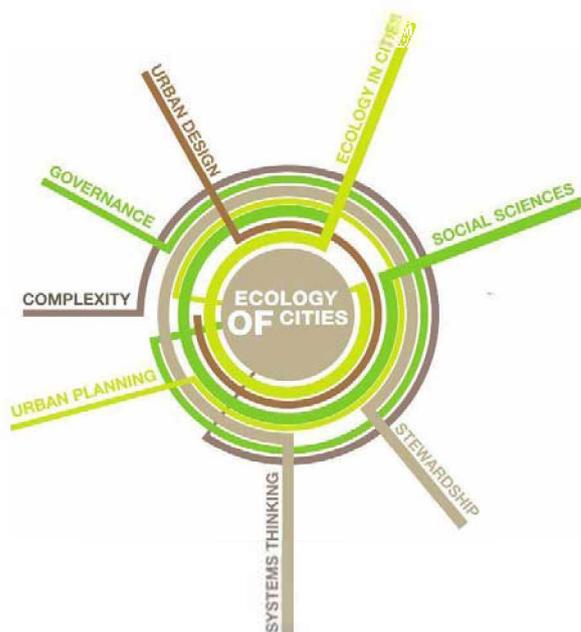
Nesse seguimento, o estudo ecológico da paisagem urbana ou ecologia urbana, pode ser de especial interesse para ampliar os alcances atuais do conhecimento do fato urbano e de seu equilíbrio com a natureza (WU, 2014). Uma vez que esse já é um campo de estudo transdisciplinar e holístico, que leva em consideração a interação de aspectos naturais e não naturais, como aspectos econômicos, sociais e do ambiente construído.

Esse campo de estudo, diferentemente da ecologia pura, lida com grandes áreas (regiões, cidades, bacias hidrográficas), que apresentam centenas ou milhares de ecossistemas concomitantes e procuram entender mais sua relação entre si e com a sociedade, do que seu funcionamento isolado (FERRARI; FERRARINI, 2008). Esse campo de pesquisa começou com uma abordagem da ‘Ecologia na Cidade’, utilizando conceitos ecológicos para adquirir conhecimento sobre como os ecossistemas urbanos se estruturam, funcionam e oferecem

serviços. Entretanto, cada vez mais examina-se também como as estruturas socioeconômicas interagem com os ecossistemas urbanos (MCPHEARSON *et al.*, 2016; WU, 2014). Essa segunda fase pode ser chamada de 'Ecologia da Cidade', onde toda a cidade é vista como um ecossistema, que incorpora humanos e suas construções (MCPHEARSON *et al.*, 2016; WU, 2014).

Para Wu (2014), atualmente a ecologia urbana pode ser definida como o estudo dos padrões espaço-temporais, impactos ambientais, e sustentabilidade da urbanização. Com ênfase na biodiversidade, processos ecossistêmicos e serviços ecossistêmicos, onde aspectos socioeconômicos e práticas de planejamento urbano influenciam profundamente os resultados e por isso contribuem, mas não sozinhos, para o centro da ecologia urbana.

Este campo vê a área urbana como uma paisagem cultural caracterizada por alta densidade populacional e extensa área de superfície impermeável, com diferentes usos e coberturas da terra formando um mosaico de padrões dinâmicos. De forma que o ecossistema urbano é um espaço heterogêneo cuja estrutura, função e dinâmica é determinada por interações entre natureza e sociedade. Esse entendimento está de acordo com o da Morfologia Urbana, que também enxerga a cidade como formada por diversos padrões que são definidos por diferentes arranjos de elementos configuracionais.



**Figura 1.2** – Disciplinas e práticas incorporadas pela abordagem da "Ecologia na Cidade". Fonte: MCPHEARSON *et al.*, 2016, p. 203

Dessa forma, os conceitos da sustentabilidade e ecologia urbana podem contribuir para um planejamento urbano que mantenha o comportamento natural da água, principalmente com: (1) um maior entendimento sobre os impactos da urbanização no clima, hidrogeologia, biota, e solos, e desses meios na urbanização, contribuindo para uma maior adaptação aos ciclos naturais; (2) um entendimento mais holístico dos padrões espaciais da urbanização, considerando não apenas a cobertura e a forma, mas também sua relação com características do meio físico; e (3) um entendimento de como as funções

ecossistêmicas sustentam o estoque de capital necessário para produzir bens e serviços para sociedade humana.

## **1.2. Contribuições da Sustentabilidade e ecologia para gestão da água na cidade por meio do planejamento urbano**

Para melhor explorar essas contribuições da sustentabilidade e ecologia para a gestão da água por meio do planejamento urbano, cada uma delas será explorada em maior profundidade neste tópico. Primeiramente, será explorado o maior entendimento dos impactos dos padrões de urbanização sobre o regime hidrológico para sua adaptação ao comportamento natural da água, envolvem o estudo do ciclo hidrológico e das alterações que esse sofre na área urbana, como será abordado em seguida.

Em segundo, com o intuito de relacionar diferentes padrões espaciais de ocupação urbana com a manutenção da função de recarga dos aquíferos, serão exploradas metodologias de planejamento ecológico que podem auxiliar na compreensão de como os padrões de ocupação podem ser menos ou mais adaptativos ao processo natural dessa função que se manifesta de formas diferentes no território.

E, em terceiro, serão explorados os aspectos da ecologia urbana que levam a compreensão dos serviços ecossistêmicos urbanos tem potencial para redefinir as perspectivas sobre as relações homem-natureza. A visão holística que norteia a ecologia urbana destaca não só a dependência e responsabilidade da cidade com um ecossistema em equilíbrio dinâmico, mas também o valor social e econômico dos serviços que a natureza presta na sua manutenção. Esse conceito se torna muito importante para o entendimento dos riscos que os diferentes tipos de ocupação do solo urbanos podem desencadear.

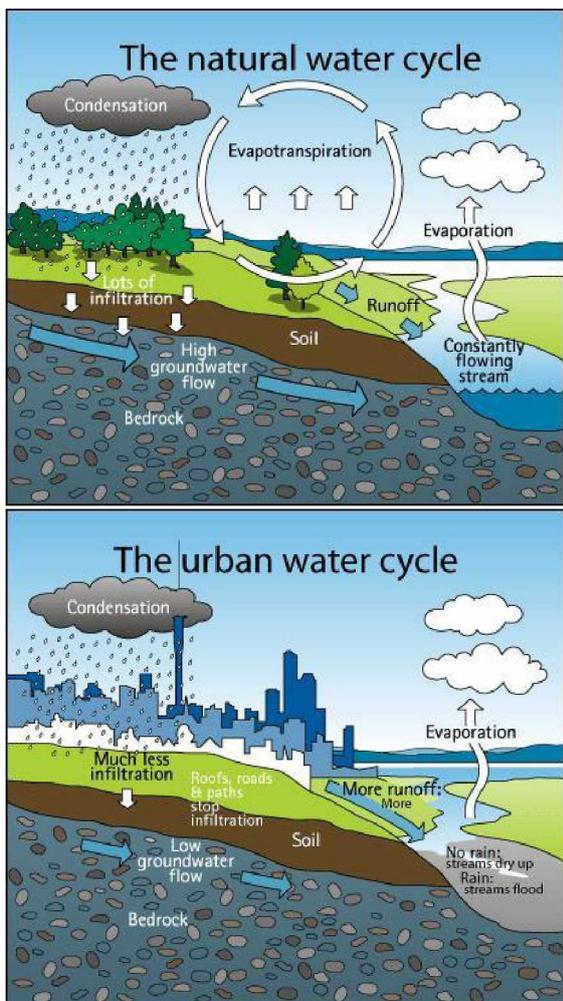
### **1.2.1. Ciclo da água e urbanização**

O ciclo da água é um conceito que fornece uma base conceitual unificadora para o estudo do equilíbrio dinâmico hídrico, envolvendo questões climáticas, hidrológicas e de uso do solo (BENINI; MENDIONDO, 2015). Há alguma diversidade de definições do ciclo hidrológico, como “um modelo conceitual que descreve o armazenamento e circulação de água entre a biosfera, atmosfera, litosfera e hidrosfera” (MARSALEK *et al.*, 2013) ou como

“o fenômeno global de circulação fechada da água entre superfície terrestre e atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre” (CARVALHO; BATISTA DA SILVA, 2006).

Durante o ciclo, a água pode estar armazenada na atmosfera, oceanos, lagos, rios, solos, geleiras, campos de neve e aquíferos. A circulação de água entre esses compartimentos de armazenamento é causada por processos fundamentalmente impulsionados pela energia solar associada à gravidade, como a evapotranspiração, condensação, precipitação, infiltração, percolação, derretimento de neve e escoamento, que também são conhecidos como etapas do ciclo da água.

A etapa da precipitação possui particular importância para sociedade, uma vez que se faz disponível em períodos regulares e constitui o total de água potável renovável disponível para utilização (POSTEL; CARPENTER, 1997). A partir dessa etapa, a água pode se



**Figura 1.3** – Alterações no ciclo natural da água causadas pela urbanização. Fonte: (CONRADIN, 2010)

movimentar para: (1) infiltrar pela superfície do solo, movendo-se para baixo, por influência da gravidade podendo se acumular nos interstícios das formações geológicas, formando os aquíferos, ou lentamente escoar para ressurgir na superfície na forma de nascentes, pântanos e alimentando rios e lagos; (2) escoar pela superfície, quando a precipitação é maior que a capacidade de absorção do solo, em direção aos rios, lagos e mares; (3) evaporar dos solos, rios, lagos e mares e retornar a atmosfera; (4) ser absorvida pelas plantas, que posteriormente liberam a água na atmosfera por meio da evapotranspiração; ou (5) congelar formando camadas de gelo no topo de montanhas e geleiras (MACHADO; PACHECO, 2010)

No ambiente natural a proporção e a velocidade com que a água circula nessas diferentes fases do ciclo hidrológico varia de acordo com fatores como a cobertura solo, altitude, topografia, temperatura, tipo do solo e

geologia. Para a manutenção do equilíbrio dinâmico do ciclo, a cobertura vegetal é destacada, na maioria dos estudos, como importante mantenedora dos padrões naturais de infiltração e escoamento, uma vez que: aumenta a permeabilidade do solo por meio de sua estrutura de raízes; consome parte da água precipitada, necessária para o seu metabolismo, que transpira de volta à atmosfera; e aumenta também a capacidade de retenção da água pela rugosidade que gera no solo; contribuindo tanto para o aumento da recarga, quanto para diminuição do escoamento superficial (MACHADO; PACHECO, 2010).

Nesse seguimento, sendo a alteração da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo uma condição relacionada ao processo de urbanização, o ciclo hidrológico é grandemente modificado com o estabelecimento das cidades. As alterações geradas pelo processo de urbanização modificaram enormemente algumas das fases do ciclo hidrológico, em relação a velocidade, proporção e qualidade com que elas ocorrem, de forma que, alguns autores, chegam a denominar um novo ciclo hidrológico, o ciclo urbano da água (MCPHEARSON; HAMSTEAD; KREMER, 2014).

De forma sintética, algumas das principais alterações causadas pela urbanização no ciclo natural da água são: o (1) aumento da impermeabilização do solo, que diminui a quantidade de água infiltrada de forma natural; (2) aumento do escoamento superficial; (3) redução de cobertura vegetal que leva a diminuição da permeabilidade do solo e à diminuição da evapotranspiração, podendo causar alterações no clima, aumento do escoamento superficial, erosão do solo e perda da qualidade e quantidade de água disponível; (4) alteração dos canais de drenagem naturais, por drenagens construídas e vias impermeabilizadas, que aceleram e alteram o percurso e destino da água da chuva; (5) modificação de cursos d'água e rios, por barragem, alargamento ou canalização, que geram uma maior sensibilidade a inundações e alteração da biota; (6) geração de esgoto e esgoto de água pluviais que são depositadas com ou sem tratamento em corpos d'água ou infiltrados no solo a partir de vazamentos, que causam poluição dos oceanos, lagos, rios, solos e aquíferos; (7) geração e deposição de resíduos sólidos em áreas, que podem vir a contaminar a água do solo (MARSALEK *et al.*, 2013).

Devido essas alterações o balanço hídrico das áreas urbanas apresenta grandes variações em relação ao das áreas naturais (MOTA, 1981; SHUSTER *et al.*, 2005). Com a redução da vegetação e impermeabilização do solo, parte da água que infiltrava no solo ou evaporava passa a compor o escoamento superficial ocasionando uma redução do tempo de

concentração da água na bacia e um aumento vazão de pico. A proporção em que esses valores se alteram varia de acordo com o tipo de solo, cobertura, clima e quantidade e padrão da área impermeabilizada. Mas alguns estudos, baseados em dados estatísticos coletados de diversos cenários, procuram estimar uma média de distribuição da água precipitada em condições e pré e pós urbanização, como mostra a tabela 1.1. a seguir.

**Tabela 1.1** - Balanço Hídrico em áreas urbanas e áreas naturais por diferentes estudos. Própria autoria, 2018

<b>Elementos dos Balanço Hídrico</b>	<b>Pré-urbano % (OCDE, 1986)</b>	<b>Urbano % (OCDE, 1986)</b>	<b>Urbano % (Hough, 1985)</b>	<b>Urbano % (MOTA, 1981)</b>
<b>Evapotranspiração</b>	40	25	15.9	30
<b>Escoamento superficial</b>	10	43	45.1	55
<b>Escoamento subterrâneo</b>	50	32	39	15

### **1.2.2. Metodologias de planejamento ecológico**

A associação dos padrões espaciais construídos da ocupação urbana com características do meio físico que regulam a recarga dos aquíferos para obter um entendimento mais holístico da ocupação do território demanda métodos de planejamento que articulem os fatores ambientais e os processos socioeconômicos nas decisões sobre o ordenamento territorial urbano.

Vamos nesse tópico apresentar, brevemente, metodologias de planejamento ecológico que podem auxiliar a estabelecer como os processos ecossistêmicos são distribuídos espacialmente e se relacionam com a estrutura urbana, atividade que pode auxiliar na proteção das funções e serviços ecossistêmicos ligados a recarga dos aquíferos.

As metodologias de planejamento ecológico, são estratégias de planejamento que provêm decisões sobre alternativas futuras como meio de mediação entre ações humanas e processo naturais (MENEGUETTI, 2007). A dimensão espacial dada aos processo ecológicos por meio dessas metodologias oferece uma linguagem comum para interações mais fortes entre planejamento urbano e ecologia (LETÃO; AHERN, 2002)

Em 1915, Patrick Geddes, já destacava que o planejamento urbano deveria começar com o levantamento dos recursos naturais e das características do meio físico de uma determinada região, para entender as respostas que o homem dá a ela e as complexidades resultantes da paisagem cultural construída, entendidas em termos dos atributos “povo-trabalho-lugar” (MENEGUETTI, 2007).

Apesar de esse caminho não ter sido o mais seguindo pelas diferentes correntes e práticas urbanísticas, o trabalho de Geddes influenciou alguns trabalhos de planejamento, que começaram a florescer nos anos 1950, sob a esfera dos estudos ecossistêmicos. Fazendo uso da teoria da informação e da noção de holismo, o estudo ecossistêmico, lançou luz no entendimento da paisagem na sua totalidade, não somente em termos de seus atributos e processos físicos e naturais, mas também em termos dos valores, processos e significados culturais ligados à paisagem, dentre elas as de natureza urbana. De acordo com Gold (1980) e Ndubisi (2002), as principais abordagens de planejamento desenvolvidas nessa época são:

- A abordagem desenvolvida por Angus Hills (1961), um cientista de solo e geógrafo canadense, que utilizava a capacidade biológica e física da terra para guiar as decisões de uso solo para agricultura, floresta, vida silvestre e recreação. Grandes áreas eram parceladas em pequenas unidades homogêneas a partir de uma classificação fisiográfica que poderiam então ser relacionadas com usos potenciais ou limitações sociais, dentro de diferentes condições de manejo impostas. Este sistema é utilizado principalmente para determinar a capacidade, conveniência e factibilidade de usos recreativos.
- A abordagem desenvolvida por Philip Lewis (1963), que enfocava em aspectos visíveis da paisagem, como forma e proporção, para, por meio de sobreposição, construir padrões ambientais. A avaliação de cada padrão é posteriormente realizada quanto ao seu potencial de uso e categorizada numericamente. Este sistema foi pioneiro quanto a conceitos de qualidade visual, diversidade e recursos do meio em corredores ambientais.
- A abordagem desenvolvida por Ian McHarg, que publicou sua metodologia em seu livro *Design with Nature* (1969), alertava os planejadores para a importância de incorporar o conhecimento de características ecológicas e naturais entre os critérios habituais de engenharia, economia e ciências sociais ao desenvolver um plano de ocupação regional. Sua metodologia, envolvia a sobreposição de mapas translúcidos de diversas características dos meios físicos e seus valores de riscos e amenidades ambientais, a depender da função ecossistêmica analisada, compondo um mapa que sugere onde certos tipos de desenvolvimento devem ou não ocorrer. Essa técnica é utilizada para indicar áreas propícias a diferentes tipos de desenvolvimento e áreas propícias a preservação.

Apesar de divergências, essas abordagens possuem características comuns, que envolvem: (1) o levantamento de características físicas do meio ambiente; (2) a organização dessas características em padrões espaciais; (4) a valoração desses padrões a depender da função estudada; e (3) o relacionamento desses padrões e de seus valores com potencialidades ou limitações à ocupação antrópica.

A partir da década de 1970, surgiram avanços na tecnologia computacional e no sensoriamento remoto, com o desenvolvimento da tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (GIS), que permitiram a ampliação da aplicação dessas metodologias de planejamento multicritérios (PICKETT et al., 2001). Além disso, com o aumento dos estudos sobre ecologia urbana e paisagem surgiram uma diversidade de novas abordagens para o planejamento ecológico, com base nas metodologias desenvolvida por esses primeiros pesquisadores, aplicando novas nomenclaturas e técnicas ou ferramentas modernizadas.

Uma dessas abordagens desenvolvida por Crepani et al. (2001) visa elaborar cartas de vulnerabilidade ou potencialidade de ocorrência de processos ecossistêmicos, com o auxílio de softwares de geoprocessamento, para orientar atividades de intervenção antrópica, de maneira a evitar agressões irreversíveis e obter maior produtividade. Nessa metodologia são levantadas características físicas do meio ambiente importantes para determinação do processo estudado, como geologia, geomorfologia, solos e outros, e posteriormente é feita uma classificação do grau de vulnerabilidade ou potencialidade dessas características. A vulnerabilidade ou potencialidade é expressa pela atribuição de valores. Os valores atribuídos aos temas individuais recebem posteriormente um valor final, resultante de média aritmética dos valores individuais, onde cada para cada tema podem ser atribuídos pesos iguais ou diferentes a depender de sua importância para o fenômeno estudado.

A partir do emprego dessas metodologias é possível um planejamento urbano que visa envolver a multiplicidade de aspectos do meio físico e da estrutura urbana nas tomadas de decisão de ordenamento territorial, contemplando a visão holística que se faz necessária a promoção da contribuição da cidade na gestão da água no meio urbano, como aqui definido nessa pesquisa.

### 1.2.3. Serviços Ecosistêmicos Urbanos

Para discutir serviços ecossistêmicos, temos que primeiramente definir o que é uma função ecossistêmica. Estas podem ser definidas como constantes interações entre os elementos dos ecossistemas, como por exemplo: transferência de energia, a ciclagem de nutrientes e a recarga dos aquíferos. De modo geral, as funções ecossistêmicas geram um ou mais serviços ecossistêmicos (TÔSTO; PEREIRA; MANGABEIRA, 2012).

O conceito de Serviços Ecosistêmicos (SE) é definido como benefícios que os humanos adquirem a partir dos ecossistemas (MEA, 2003) ou como contribuições diretas e indiretas dos ecossistemas para o bem-estar dos indivíduos (TEEB, 2011). Essa abordagem de estudo procura reconhecer a ampla gama de benefícios proporcionados pelos ecossistemas e a biodiversidade, demonstrando seus valores em termos econômicos e sociais, para que seja possível capturar esses valores nas tomadas de decisões.

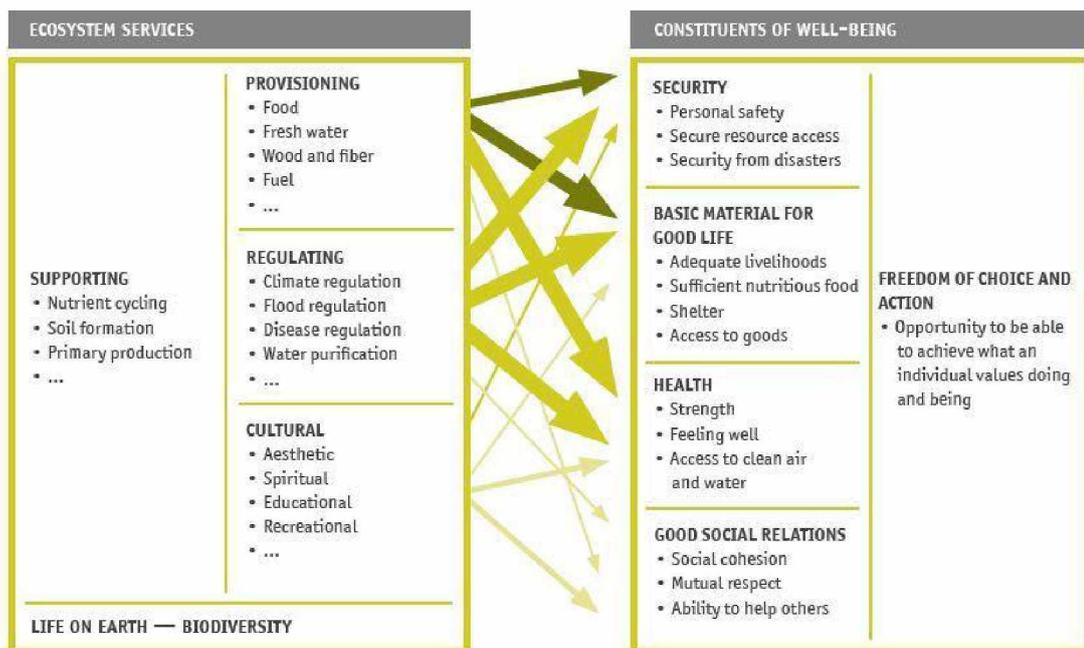


Figura 1.4 - Conexões entre os serviços ecossistêmicos e a qualidade de vida (MEA, 2005, p. 50).

Os serviços ecossistêmicos com um todo, tem sido classificados de acordo com os benefícios que proporcionam, em quatro categorias: (1) serviços de provimento, (2) serviços de regulação, (3) serviços de habitat ou suporte e (4) serviços culturais (MEA, 2003). Serviços de provisão incluem materiais que são providos pelos ecossistemas para nosso consumo, como comida, água, plantas medicinais e outros recursos. Serviços de regulação são os que mantêm funções importantes para o equilíbrio ambiental, como a qualidade do ar, qualidade

do solo, controle de enchentes, nível de base dos rios e controle de doenças. Serviços de habitat ou suporte são os que sustentam quase todos os outros, fornecendo espaços de vida para os organismos. E finalmente, os serviços culturais incluem os benefícios sócio ecológicos não materiais associados com o contato com a natureza, como recreação, estética, efeitos psicológicos e turismo.

Especificamente, as funções desempenhadas pelo ciclo hidrológico oferecem serviços ecossistêmicos em todas essas categorias: (1) serviços de suprimento; (2) serviços de suprimento de outros recursos que dependem da água; (3) serviços de regulação; (4) serviços culturais; (5) serviços de suporte (POSTEL; CARPENTER, 1997).

**Tabela 1.2** - Quadro com os principais serviços gerados pelo ciclo hidrológico. Adaptado de Postel e Carpenter (1997)

Serviços de suprimento	Serviços de suprimento de outros recursos	Serviços de regulação	Serviços culturais	Serviços de suporte
Para usos domésticos: beber, cozinhar, lavar e outros; para usos industriais; para irrigação; e aquicultura	Peixes, aves aquáticas e mexilhões e moluscos.	Controle de inundações; controle do clima; fertilização do solo; diluição de poluentes; e regulação do fluxo da água	Transporte; recreação e esportes d'água; geração de energia	Habitat de pássaros e outros animais selvagens

Além das categorias listadas pelo *Millennium Eco system Assessment* (2003), uma outra importante benefício proporcionado pelos serviços ecossistêmicos é o econômico (GÓMEZ-BAGGETHUN; BARTON, 2013; TEEB, 2011). Métodos de custo evitado, por exemplo, mostram que a perda de vegetação urbana leva ao aumento dos custos de energia com resfriamento no verão, assim como a perda dos serviços de regulação da água devidos a mudanças no uso da terra nas bacias da cidade diminui a quantidade e qualidade de água, o que exige a construção de novas captações e plantas de tratamento dispendiosas (GÓMEZ-BAGGETHUN; BARTON, 2013; MCPHEARSON; HAMSTEAD; KREMER, 2014). Essa categoria é especialmente importante, visto que, vários dos serviços oferecidos pelos ecossistemas são amplamente substituídos por infraestrutura construída e que os cálculos de finanças públicas tradicionais negligenciam os custos de sua substituição e recuperação, uma vez que esses são perdidos ou degradados.

Ao se falar de valor econômico dos serviços ecossistêmicos, não podemos deixar de abordar a diferença entre serviços ambientais e serviços ecossistêmicos. Os serviços

ambientais são aqueles prestados por agentes econômicos ou políticos para conservação e/ou recuperação de ecossistemas, suas funções e seus serviços ecossistêmicos (TÔSTO; PEREIRA; MANGABEIRA, 2012). Ou seja, os serviços ambientais estão associados aos benefícios gerados por ações de manejo, proteção e uso sustentável dos ecossistemas e podem estar associados à um pagamento.

O Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) é um instrumento econômico que visa a minimização da falha na gestão atual de não considera o valor dos serviços ecossistêmicos, por meio da criação de novos mercados, à exemplo do mercado do sequestro de carbono. No Brasil, existe um Projeto de Lei (PL 312/2015) na câmara para a instituição de uma Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, que ao ser aprovada facilitará a aplicação nacional desse instrumento.

Nas áreas urbanas, os serviços ecossistêmicos, são oferecidos pelo ecossistema presentes na dentro da própria cidade. Apesar dos habitats naturais dentro da cidade oferecerem menos serviços do que os habitats fora das cidades, devido especialmente à sua fragmentação e pequena extensão, eles ainda possuem um papel importante na manutenção do bem-estar da população (MCPHEARSON; HAMSTEAD; KREMER, 2014). Alguns exemplos desses ecossistemas naturais urbanas incluem: ruas arborizadas, parques, jardins e hortas urbanas, quintais, florestas urbanas, áreas pantanosas, rios e lagos que ainda prestam importantes serviços ecossistêmicos (BOLUND; HUNHAMMAR, 1999). Contudo, a relação entre os habitats urbanos e seus serviços ecossistêmicos ainda não é bem conhecida (MCPHEARSON *et al.*, 2015).

Oito serviços ecossistêmicos urbanos considerados de maior importância para o bem-estar da população, pela literatura, são: (1) a regulação da qualidade do ar; (2) a regulação do microclima; (3) a regulação de ruídos; (4) a regulação do fluxo das águas; (5) a mitigação do escoamento superficial; (6) o tratamento do águas residuais; (7) os valores culturais e recreativos; (8) a produção de alimentos; (9) a polinização e dispersão de sementes; e (10) o controle de erosão. (BOLUND; HUNHAMMAR, 1999; GÓMEZ-BAGGETHUN; BARTON, 2013).

Esses serviços listados são prestados por mais de um ecossistema simultaneamente. E cada ecossistema presta vários e diferentes serviços. Por conseguinte, é impossível proteger um serviço separadamente porque sua disponibilidade depende do funcionamento do ecossistema como um todo (KRONENBERG, [S.d.]). Por exemplo, todos os ecossistemas

contribuem para regulação do clima e oferecem valores culturais e recreativos e as zonas pantanosas são um ecossistema que contribuí para todos os serviços considerados de maior importância dentro das áreas urbanas (BOLUND; HUNHAMMAR, 1999).

A recarga dos aquíferos, especificamente, é uma função desempenhada por vários dos ecossistemas urbanos e está associada diretamente aos serviços de regulação do fluxo das águas e mitigação do escoamento superficial (tabela 1.3).

**Tabela 1.3** - Ecossistemas e seus serviços gerados localmente. Com base em BOLUND e HUNHAMMAR (1999), p.299

	<b>Floresta urbanas</b>	<b>Parques e quintais</b>	<b>Terra cultivada</b>	<b>Zonas pantanosas</b>	<b>Rios</b>	<b>Lagos</b>	<b>Aquíferos</b>
<b>Regulação da qualidade do ar</b>	X	X	X	X			
<b>Regulação do microclima</b>	X	X	X	X	X	X	
<b>Redução de ruídos</b>	X	X	X	X			
<b>Regulação do fluxo das águas</b>							X
<b>Mitigação do escoamento superficial</b>	X	X	X	X			X
<b>Tratamento das águas residuais</b>				X			
<b>Valores culturais e recreativos</b>	X	X	X	X	X	X	
<b>Produção de alimentos</b>	X	X	X				
<b>Polinização e dispersão de sementes</b>	X	X	X				
<b>Controle de erosão</b>	X	X	X				

Diante dessas constatações é importante ressaltar que a cidade possui ecossistemas naturais capazes de fornecer vários serviços ecossistêmicos, incluindo os relacionados com a recarga dos aquíferos. Esse entendimento, de que a cidade não afeta a natureza apenas negativamente e de que também somos afetados por essas mudanças, positivas ou negativas, gera uma nova forma pensar e valorar nossa relação com o meio ambiente.

## **Síntese do Capítulo**

Os principais pontos abordados que são relevantes da pesquisa podem ser sintetizados da seguinte forma:

- (i) Necessidade de incorporar uma base da sustentabilidade e ecologia ao planejamento urbano para atingir de forma satisfatória o objetivo de manutenção do equilíbrio dinâmico natural das águas no meio urbano;
- (ii) O ciclo hidrológico é largamente alterado pela urbanização, principalmente quanto ao tempo, proporção e qualidade com que a água da chuva se distribui nos seus possíveis reservatórios;
- (iii) As metodologias de planejamento ecológico fortalecem a inserção da base teórica da ecologia e sustentabilidade no planejamento urbano dado que possibilita o entendimento do território em termos de relacionamentos espaciais, cronológicos e ecossistêmicos;
- (iv) As cidades não são ecologicamente inertes, sendo que não só existem serviços ecossistêmicos sendo prestados pelos seus ecossistemas, como esses serviços podem ser de grande importância para o bem-estar da população.

Especificamente, quanto a recarga dos aquíferos ficou claro que a infiltração da água da chuva, forma pela qual essa função ocorre, é uma das etapas do ciclo hidrológico mais alteradas pela urbanização. Mas ainda assim é uma função que pode ser desempenhada dentro dos ecossistemas da cidade, como áreas gramadas e arborizadas, se as mesmas foram planejadas para tal e que gera importantes serviços, tanto de abrangência local, como a mitigação das enchentes, como de abrangência regional, com a regulação do fluxo d'água em corpos hídricos superficiais.

Sendo ainda importante no planejamento urbano considerar o ordenamento do território de forma que seja possível manter a manutenção do equilíbrio dinâmico natural das águas, uma vez que vários dos serviços prestados por esse recurso e pela manutenção de seu ciclo não podem ser substituídos.

## CAPÍTULO 02

### Relações entre o processo de recarga dos aquíferos e o processo de urbanização

Esse capítulo introduz algumas definições básicas relacionadas aos aquíferos e cria uma base para entender o processo de recarga e suas áreas de ocorrências naturais. Introduz, também, as condicionantes do meio físico do processo de urbanização. A partir dessa base, organiza-se as relações entre as áreas propícias à recarga e à de ocupação do solo urbano e alterações na recarga dos aquíferos causadas pelo processo de urbanização.

Para isso, o capítulo se divide em três partes: (1) uma trata das principais terminologias e definições relacionadas com os aquíferos, o processo de recarga e suas funções ecossistêmicas; (2) uma trata das condicionantes do meio físico relacionadas com o processo de urbanização e sua relação com as condicionantes do processo de recarga dos aquíferos; (3) e uma trata das alterações na recarga dos aquíferos causadas pelo processo de urbanização.

#### 2.1. Definições relacionadas ao processo de recarga dos aquíferos

Reservatório	Volume %	Tempo médio de permanência
Oceanos	94	4.000 anos
Geleiras	2	10 anos a 1.000 anos
Águas subterrâneas	4	2 semanas a 10.000 anos
Águas superficiais	<0,01	2 semanas a 10 anos
Umidade nos solos	<0,01	2 semanas a 1 ano
Biosfera	<0,01	1 semana
Atmosfera	<0,01	~10 dias

**Figura 2.1** – Volumes estimados dos reservatórios naturais de água e seu tempo de permanência. Fonte: adaptado de GHOSH e DESAI (2006), p. 2.

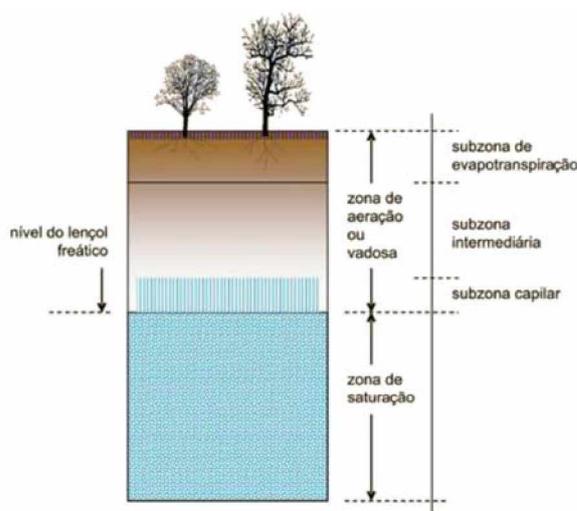
Águas subterrâneas é um termo usado para denotar todas as águas que se encontram sob a superfície do solo. A separação dos recursos hídricos em águas superficiais e subterrâneas é artificial, já que na verdade elas fazem parte de um mesmo sistema

conectado, o ciclo hidrológico, e qualquer mudança em um desses componentes afetará eventualmente o outro, entretanto essa separação é importante para o estudo e gestão do comportamento da água nesse espaço.

O subsolo é o maior e mais bem distribuído de reservatório água doce no mundo, contendo 97% do volume de água doce disponível. Esse recurso abastece 2,5 bilhões de

peças diariamente e centenas de milhões de agricultores, que dependem das águas subterrâneas para sustentar seus meios de subsistência e contribuir para a segurança alimentar (WWAP, 2015). No Brasil, por exemplo, as reservas renováveis de águas subterrâneas atingem cerca de 42,3 mil m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>, dos quais apenas 0,2% são explorados para o abastecimento em 53% dos municípios (ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2016).

### 2.1.1. Distribuição da água no subsolo



As formações subterrâneas são divididas verticalmente em zonas de acordo com a proporção de água em seus poros. Essencialmente, temos uma zona de saturação onde os poros estão preenchidos principalmente com água e uma zona de aeração onde os poros estão preenchidos principalmente com gases.

Figura 2.2 - Distribuição da água no subsolo. Fonte: (ACQUASOLO, [S.d.])

A zona saturada é normalmente delimitada por uma superfície

imaginária denominada lençol ou membrana freática, onde a pressão ainda é a atmosférica<sup>4</sup>. Essa é a zona onde se encontram os aquíferos.

A zona de aeração ou zona vadosa se estende do lençol freático até a superfície do solo, sendo a zona onde a água é filtrada antes de entrar nos aquíferos. Essa zona se divide em três subzonas, de cima para baixo: (1) subzona de evapotranspiração ou subzona do solo; (2) subzona intermediária; (3) e subzona capilar ou franja capilar (BEAR, 2007; TEIXEIRA et al., 2000).

A subzona de evapotranspiração é responsável por manter a água da qual depende a vegetação, sendo que a umidade dessa zona num momento de precipitação influencia a quantidade de água que se move para baixo por infiltração para a próxima subzona. A quantidade de água transmitida pelo solo para as camadas inferiores

<sup>3</sup> Segundo Rebouças *et al.* (1994) 25% do volume estimado de reservas renováveis dos aquíferos representaria a disponibilidade explorável dos aquíferos.

<sup>4</sup> Dependendo do tipo de solo a saturação dos poros pode ocorrer um pouco acima do lençol freático

depende de uma característica chamada de capacidade de campo, que corresponde ao volume de água adsorvido pelo solo, que fica parado por forças capilares em volta de suas partículas, não sofrendo movimento para níveis inferiores, apenas para cima por evaporação ou transpiração vegetativa. Esse volume de água que participa do solo nessa zona não contribui com a recarga da água nas zonas saturadas (BEAR, 2007).

A próxima subzona, a intermediária, pode não existir caso o lençol freático seja pouco profundo. A água que passa por ela se move apenas para baixo por gravidade em direção aos aquíferos. A subzona capilar fica logo acima do lençol freático e é considerada praticamente saturada, sendo que aproximadamente 75% de seus poros são preenchidos com água (BEAR, 2007). Sua espessura, normalmente menor de 1m, depende principalmente das características do solo (BEAR, 2007). Nessa zona já pode existir um fluxo horizontal de água além do fluxo vertical, configurando um escoamento subsuperficial que pode alimentar rios ou nascentes.

A água contida na zona saturada se encontram entre formações geológicas, que são separadas em quatro categorias de acordo com sua capacidade de armazenar e transmitir água: aquíferos, aquíferos, aquíferos, aquíferos e aquíferos (BEAR, 2007; TEIXEIRA et al., 2000).

Os aquíferos são grupos de formações geológicas, que contém água e que permitem o movimento da mesma por ele, de forma que essa água pode ser extraída ou descarregada em bacias superficiais, desempenhando diversas funções ecossistêmicas. Outros termos são utilizados, como reservatório ou bacia subterrânea e zonas de suporte de água.

Os aquíferos possuem natureza semipermeável, uma vez que transmitem água, mas numa taxa muito inferior à dos aquíferos, podendo ao mesmo tempo separar e permitir a passagem de água entre aquíferos adjacentes. Aquíferos podem conter água, mas não permitem seu movimento e são consideradas para todos os propósitos práticos impermeáveis. E, finalmente, os aquíferos não transmitem nem contém água. Em todas essas formações geológicas, devido à baixa ou inexistente capacidade de transmissão ou armazenamento de água, sua utilização é pouco viável. Por isso a pesquisa irá focar-se na água presente nos aquíferos, que são os reservatórios de água subterrânea potável e acessível.

## 2.1.2. Fatores intervenientes na formação dos aquíferos

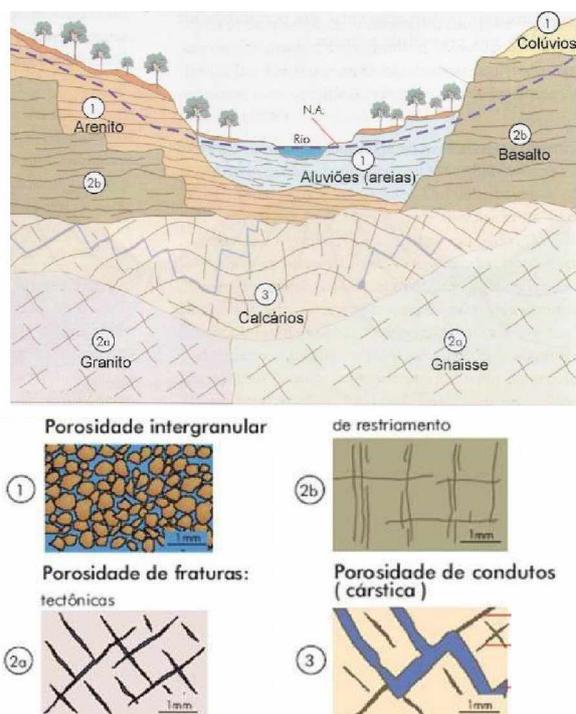


Figura 2.3 – Classificação da estrutura dos poros aquíferos. Fonte: (SILVA, [S.d.]

Os aquíferos podem ser divididos em duas grandes categorias: os aquíferos confinados e não confinados. Os aquíferos não confinados, podem ser também chamados de livres ou freáticos. Esses têm como seu limite superior o lençol freático e são aquíferos mais rasos ou superficiais. São esses os aquíferos ligados a nascentes, à regulação do fluxo de água de rios e lagos e recarga de outros aquíferos profundos, quando há uma superfície permeável ou semipermeável entre eles.

Os aquíferos confinados e semiconfinados estão isolados por uma camada impermeável ou semipermeável, sendo que seu topo não é definido pelo lençol freático. Isso faz com que a água desses aquíferos esteja numa pressão maior que a atmosférica e causa que a água de poços profundos fiquem em níveis superiores ao do lençol freático (BEAR, 2007). Esses aquíferos geralmente são mais profundos do que os aquíferos freáticos e podem ser recarregados ou por meio dos próprios aquíferos livres ou por áreas específicas na superfície onde a camada confinante termina.

Alguns dos mais importantes parâmetros hidráulicos para entender o processo de circulação e armazenamento da água nos aquíferos, livres ou confinados, são: a porosidade (P) e a condutividade hidráulica (K) (ANDREOTE, [S.d.]; BEAR, 2007).

A porosidade nada mais é do que o volume vazio existente nos solos e rochas que se torna um potencial espaço para o preenchimento com água. O valor da porosidade (P) é a razão entre o volume de vazios e o volume de sólidos. A estrutura dos poros dos aquíferos, livres ou confinados, podem ter características geométricas, que geralmente se dividem em: (1) intergranulares; (2) fraturados ou fissurados; e (3) cársticos. A característica geométrica dos poros afeta a forma como eles transmitem e armazenam água. Na porosidade intrergranular, a circulação da água ocorre pelos poros,

entre diferentes tipos de granulações, de forma homogênea, permitido o fluxo de água lento, mas em diferentes direções. Na porosidade fracturada ou fissural, a circulação da água ocorre por fraturas, fendas e falhas abertas por movimentos tectônicos, sendo que a capacidade de armazenamento e transmissão depende da quantidade de fraturas e sua intercomunicação. Na porosidade cárstica, a circulação da água ocorre por cavidades originadas por dissolução das rochas, que podem formar compartimentos heterogêneos e descontínuos de grandes dimensões e logo têm a capacidade de gerar grandes vazões. Esses três tipos de estrutura não são mutuamente exclusivos dentro de um mesmo aquífero (BEAR, 2007; TEIXEIRA et al., 2000).

A condutividade hidráulica (K) indica a permeabilidade do material e é um dos principais parâmetros na determinação da capacidade de recarga dos aquíferos. Ela é constante para cada tipo de solo e rocha com uma mesma porosidade, sendo que depende das características físicas do meio poroso, tamanho e conectividade, e das propriedades do fluido que o atravessa. A condutividade hidráulica é expressa em m/s; m/h; ou m/dia, representando em quanto tempo o fluido consegue percorrer uma certa distância naquele solo ou rocha (ANDREOTE, [S.d.]).

Além desses parâmetros, as variáveis de transmissividade (T) e vazão (Q) indicam taxas volumétricas do fluxo da água pelo aquífero, sendo obtidas a partir da integração da condutividade hidráulica (K) do meio com dimensões da camada do aquífero. A transmissividade (T) é dada pela multiplicação da altura (b) de uma seção do aquífero pela condutividade hidráulica (K) sendo expressa em  $m^2/s$ . Enquanto a vazão é dada pela multiplicação de uma área (A) de uma seção do aquífero pela condutividade hidráulica (K) sendo expressa em  $m^3/s$ . Essas medidas são importantes por representar a capacidade volumétrica de transmissão de água do aquífero (ANDREOTE, [S.d.]).

### **2.1.3. Principais funções e serviços ecossistêmicos dos aquíferos**

Compreender as funções ecossistêmicas desempenhadas pelos aquíferos e que são responsáveis pela geração de vários serviços essenciais à sustentação da vida urbana, dentro de uma visão pragmática, é um fator motivador para o exercício de um planejamento ecológico do território urbano.

Tomando como referência as discussões sobre funções e serviços ecossistêmicos do capítulo anterior e as características e processos físicos que ocorrem nos aquíferos descritas nas sessões anteriores é possível destacar três principais funções ecossistêmicas dos aquíferos: (1) a função armazenadora; (2) a função de condução; e (3) a função filtro (BEAR, 2007; CAMPOS, 2004). Essas funções ecológicas estão associadas à serviços ecossistêmicos principalmente de regulação e provimento.

A função armazenadora, está relacionada com duas características do aquíferos: o grande volume de espaço disponível entre os seus poros e a sua condutividade hidráulica (K), que permite o movimento da água por suas estruturas, mas em baixa velocidade, sendo que mesmo que os aquíferos não sejam confinados grandes volumes de água ficam acumulados nessas estruturas durante grandes períodos de tempo (BEAR, 2007; CAMPOS, 2004). Essa função se relaciona com dois serviços ecossistêmicos: (1) provimento de água; e (2) regulação das vazões de água superficial.

A função de condução da água, se deve as características de condutividade hidráulica (K) dos aquíferos que conseguem transportar a água entre diferentes zonas de recarga à áreas de recarga de aquíferos confinados, descarga e extração (BEAR, 2007; CAMPOS, 2004). Essa função é especialmente importante para os serviços de: (1) provimento de água e (2) regulação das vazões de água superficial no período de seca.

Finalmente, a função filtro se deve ao fato de que o maciço natural permeável apresenta capacidade filtrante e de depuração biogeoquímica (BEAR, 2007; CAMPOS, 2004). Essa função oferece o serviço ecossistêmico de: (1) regulação da qualidade da água e (2) provimento da água.

Sendo então três os principais serviços ecossistêmicos passíveis de serem aproveitados a partir das funções ecossistêmicas desempenhadas pelos aquíferos: (1) provimento da água; (2) regulação da qualidade da água; e (3) regulação das vazões de água superficial nos períodos de seca.

Devido à função de armazenamento e filtro, os aquíferos são capazes de oferecer o serviço ecossistêmico de provimento de água, em grandes quantidade e qualidade, sendo que, em condições naturais, a água subterrânea é naturalmente purificada e clarificada, reduzindo custos com tratamentos convencionais para o abastecimento doméstico, industrial ou agrícola. E devido a função de condução localiza-se, geralmente, em áreas mais próximas a demanda do que os mananciais superficiais.

Ainda, as funções de armazenamento e condução contribuem para a transmissão lenta das águas das chuvas até a rede hidrográfica superficial, composta por nascentes, drenagens, lagos, rios e oceanos, gerando o serviço ecossistêmico de regulação das vazões das águas superficiais, que é especialmente importante para a manutenção da perenidade dessa rede em regiões com meses pouco chuvosos ou com baixo volume de precipitação pluviométrica.

A função de armazenamento também contribui para a regulação do escoamento superficial, absorvendo parte da água precipitada e da água de transbordo dos rios, sendo importante para mitigação de inundações e oferecendo a possibilidade de retenção intencional da água da chuva, seja temporária ou não.

#### 2.1.4. Processo de recarga natural dos aquíferos

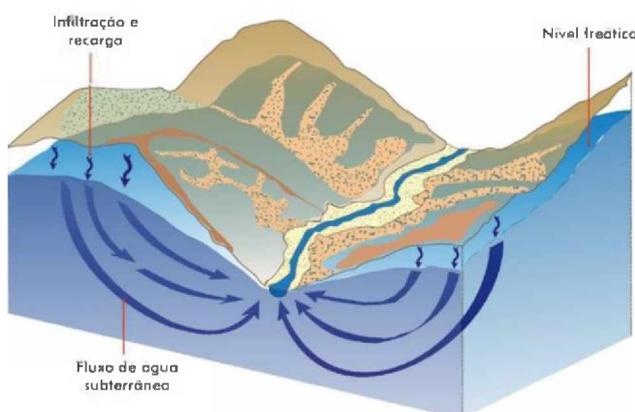


Figura 2.4 – Fluxo de água subterrânea. Fonte: (SILVA, [S.d.])

A recarga natural dos aquíferos é uma etapa do ciclo hidrológico essencial para o equilíbrio dinâmico do mesmo e para que os aquíferos sejam capazes de manter o desempenho de suas funções e serviços descritos na sessão anterior.

A recarga dos aquíferos freáticos dá-se de forma direta em áreas com disponibilidade hídrica proveniente principalmente da precipitação<sup>5</sup> e onde a geomorfologia, cobertura do solo e formações geológicas permitam a infiltração, armazenamento e deslocamento subterrâneo da água. Enquanto a recarga dos aquíferos confinadas se dá principalmente a partir de aquíferos freáticos adjacentes por camadas semipermeável ou permeável entre eles.

A infiltração de chuva é controlada principalmente por três mecanismos: a taxa máxima possível de entrada da água através da superfície do solo, que depende da declividade e tipo de cobertura do solo; a taxa de movimento da água através da zona vadosa, que depende de suas características físicas, como espessura e condutividade

<sup>5</sup> Em alguns casos a água da recarga natural também pode ser proveniente de corpos hídricos superficiais e quantidades muito pequenas podem ser de origem magmática.

hidráulica; e a taxa de drenagem da zona vadosa para a zona saturada, que depende das características da zona capilar. Enquanto o armazenamento e deslocamento subterrâneo dependem das características físicas da zona saturada, como tipo de porosidade e condutividade hidráulica.

Ou seja, o volume de água que recarrega os aquíferos corresponde ao volume de água da precipitação que infiltra no solo, a depender da distribuição das chuvas, topografia, cobertura do solo e permeabilidade do solo, passando pela zona vadosa e atingindo a zona saturada. Esse volume de água que é continuamente abastecida por meio das águas da chuva é chamado de reserva ativa ou reguladora. A quantidade dessas reservas que permanece nos aquíferos é dada pela quantidade de água recarregada menos a água que é descarregada nos corpos hídricos superficiais e nascentes (BEAR, 2007; SILVEIRA; USUNOFF, 2009).

Sob condições naturais, apenas uma parcela das reservas reguladoras é passível de exploração, constituindo o potencial ou reserva explorável do aquífero. Em geral, esta parcela é calculada entre 25% e 50% das reservas reguladoras (REBOUÇAS, 1994). Esse volume de exploração pode aumentar em função das condições de ocorrência e recarga, bem como dos meios técnicos e financeiros disponíveis, considerando que a soma das extrações com as descargas naturais do aquífero para rios e oceano, não pode ser superior à recarga natural do aquífero. A água armazenada no passado longínquo nos aquíferos confinados, normalmente sob condições climáticas diferentes, não deve ser considerado um recurso renovável.

Segundo Scanlon, Healy e Cook (2002), não existe uma abordagem universal para estimar a taxa de recarga de águas subterrâneas. O número de métodos reportados na literatura é grande, dentre os quais se destacam (i) os que se baseiam em medições do nível freático, (ii) os métodos químicos, baseados na utilização de traçadores, (iii) os métodos baseados em medições diretas ou indiretas de fluxos hidrológicos, como os de escoamento de base e de balanço hídrico, e (iv) os métodos baseados em modelagem/simulação; hidrológica ou numérica. Não iremos nos estender nesses métodos, uma vez que saber a taxa de recarga é mais importante para as concessionárias de água e agências reguladoras que regulam a extração desse recurso. Para o planejamento urbano interessa mais saber onde e como esses fenômenos ocorre, com o objetivo de mitigar sua perda.

Em condições naturais, o total da água precipitada que infiltra no solo em direção aos aquíferos dependem de principalmente dos seguintes fatores: (1) a topografia; (2) a altura, intensidade e duração da chuva; (3) o tipo de cobertura vegetal do solo; (4) a capacidade de campo e umidade antecedente do solo; e (5) propriedades hidráulicas do solo (BEAR, 2007; MOTA, 1981; RUSHTON, 1988; SIMMERS, 1987). É importante ressaltar que as mesmas características que favorecem a recarga dos aquíferos (a exceção da espessura dos solos) também favorecem sua poluição quando expostos a fontes poluidoras. O que faz das áreas de recarga, especialmente sensíveis, tanto para a manutenção da quantidade quanto da qualidade da água subterrânea (MOTA, 1981).

Esses fatores supracitados podem ainda ser divididos de acordo com a zona onde ocorrem (RUSHTON, 1988; SIMMERS, 1987), como mostrado no detalhamento a seguir:

- (i) **Na atmosfera** são importantes principalmente: a altura, intensidade e duração da chuva.

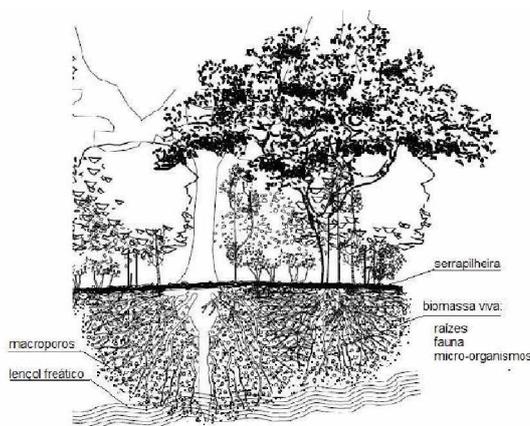
Três características das chuvas influenciam na infiltração de água no solo: (1) altura, (2) intensidade e (3) duração. A altura precipitada é importante, já que para a água chegar a infiltrar seu volume precisa ser maior do que as perdas que ocorrem por interceptações, retenção em depressões e infiltração até a saturação da camada superficial do solo. Além disso, chuvas menos intensas, regularmente distribuídas ao longo do tempo, promovem uma infiltração maior pois, desta maneira, a velocidade de infiltração pode acompanhar a altura de precipitação gerada. Ao contrário, chuvas torrenciais favorecem o escoamento superficial direto, pois a taxa de infiltração é inferior à altura de água precipitada em um curto intervalo de tempo. A duração das chuvas também é relevante, já que vários estudos demonstram que a taxa de infiltração da água no solo é elevada no início do processo de infiltração e decresce exponencialmente com o tempo, aproximando-se de um mínimo constante quando o solo se encontra saturado.

- (ii) **Na superfície da terra** são importantes principalmente: a topografia; e o tipo de cobertura do solo.

A topografia influencia a recarga por meio da: (1) altitude e (2) declividade. O padrão do fluxo de movimento da água entre as áreas de recarga e descarga

ocorre a partir da força da gravidade e pressão, normalmente de áreas mais elevadas para áreas menos elevadas em direção a drenagens superficiais ou oceanos, formando bacias hidrográficas subterrâneas, que acompanham o relevo do terreno (SIMMERS, 1987). Dessa forma, as áreas mais altas são responsáveis por recargas regionais dos aquíferos, enquanto áreas menos elevadas, próximas as drenagens superficiais, por recargas locais, que mais são descarregadas nos corpos hídricos superficiais do que armazenadas (SILVEIRA; USUNOFF, 2009). Ainda, a declividade do terreno influencia a infiltração da água. Os declives acentuados, acima de 20%, favorecem o escoamento superficial direto, diminuindo a infiltração (KALIRAJ; CHANDRASEKAR; MAGESH, 2014). Enquanto, superfícies planas ou suavemente onduladas permitem o escoamento superficial mais lento, aumentando a possibilidade de infiltração.

A cobertura vegetal nativa do terreno também afeta as taxas de infiltração da água no solo. As raízes das plantas, fauna, e tuneis de micróbios, escavam, penetram e juntam as partículas do solo de forma a melhorar sua estrutura e porosidade (HINMAN, 2012). Os micro e macro poros criados por essas estruturas melhoram a capacidade de retenção e infiltração do solo. Nesse seguimento, as áreas com cobertura vegetal do tipo arbóreo, possuem raízes mais profundas, mais capazes de alterar a estrutura do solo ao seu redor e abrir caminhos para a água, contribuindo para aumentar sua porosidade (AMARAL, 2015; BENINI; MENDIONDO, 2015). Enquanto a porosidade criada pelas



**Figura 2.2** - Arranjo das raízes de árvores no solo e sua contribuição para aumento de porosidade. Fonte: AMARAL, 2015

raízes das gramíneas é apenas superficial, não contribuindo no mesmo grau para o aumento da permeabilidade do solo. Entretanto, a cobertura vegetal também exerce a função de retardamento de parte da água que atinge o solo, através da interceptação, sendo que o excesso que não é consumido pelas plantas, é lentamente liberado para o solo.

(iii) Na subzona de

**evapotranspiração ou do solo** são importantes principalmente: capacidade de campo do solo; a umidade antecedente do solo; e as propriedades hidráulicas do solo;

A umidade do solo anterior à precipitação também influencia a infiltração da água que chega aos aquíferos devido a capacidade de campo do solo, sendo que a primeira camada de água adsorvida pelo solo quando este está pouco umido contribui apenas para completar essa capacidade, não sofrendo movimentos para níveis inferiores. Sendo assim quando os solos estão secos, parte da água da chuva é absorvida na primeira zona, enquanto quando a umidade do solo já corresponde a capacidade de campo o volume precipitado infiltrado percola em direção aos aquíferos (GONÇALVEZ, 2012). Ainda, quando os solos estão saturados acima da capacidade de campo as taxas de infiltração diminuem.

O tipo de solo é o fator mais decisivo em relação as taxas de infiltração. Os solos mais porosos e permeáveis, em geral com maior teor de areia, possuem altas taxas de infiltração. Enquanto solos mais finos e de menor porosidade, em geral com maior teor de argila, possuem menores taxas de infiltração.

- (iv) **Na subzona intermediária** são importantes principalmente: as propriedades hidráulicas do solo; e sua espessura.

Além da maior permeabilidade discutida acima, a espessura das zonas vadasas do solo, principalmente das zonas intermediárias, também exerce um importante papel no controle de infiltração, retendo temporariamente parte da água de infiltração que posteriormente é liberada lentamente para o aquífero subjacente. Sendo assim os solos mais facilitadores da recarga são aqueles profundos e porosos com condutividade hidráulica média em torno de  $10^{-5}$  m/s.

O cruzamento espacial dessas condicionantes físicas do processo de recarga, pode ser feito por meio de metodologias de planejamento ecológico e permite verificar a ocorrência de áreas onde esse fenômeno possui maior potencial de ocorrer. Para isso é necessário a caracterização local da geomorfologia; cobertura do solo; clima; e pedologia da região.

Da geomorfologia, que representa o padrão de relevo que predomina em cada região, deve-se avaliar o funcionamento hídrico subterrâneo do relevo, ou seja, como ele influencia nas condições gerias recarga e descarga dos aquíferos. Sendo que a densidade de drenagem, comprimento e inclinação de rampas e altitudes relativas são os

principais critérios a serem avaliados. Da cobertura do solo importa saber principalmente a quantidade de cobertura vegetal, principalmente nativa, que são as áreas que possuem maior contribuição para manutenção da estrutura porosa do solo.

Dos elementos climáticos como a temperatura do ar, a precipitação pluvial, a insolação e a evaporação; a precipitação pluvial é uma das etapas do ciclo hidrológico que constitui um fator importante para os processos de escoamento superficial, infiltração, evaporação, transpiração, recarga dos aquíferos, vazão dos rios e outros. Para melhor compreensão da distribuição espacial e temporal da precipitação pluvial é necessário utilizar séries históricas de dados. Da pedologia é importante o estudo de seu funcionamento hídrico, sendo importante principalmente a condutividade hidráulica vertical da zona vadosa e sua espessura.

Para facilitar a análise, esses elementos ainda podem ser divididos em dois grupos: os de maior permanência e constância no tempo e os de maior variabilidade temporal. Sendo que as características geomorfológicas e pedológicas de uma região se encaixam no primeiro grupo, já que, embora possam ser modificados numa menor escala, na escala regional há uma permanência temporal de suas características. Enquanto, o tipo de cobertura do solo e o clima podem apresentar mudanças muito mais rápidas. É importante essa diferenciação para utilizar as características constantes como base para o planejamento das características variáveis.

**Tabela 2.1** - Critérios de avaliação do meio físico relacionados a recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018.

<b>Identificação de áreas de alta sensibilidade a recarga de aquíferos</b>			
<b>Caracterização necessária</b>	<b>Critérios de avaliação</b>	<b>Fatores relacionados à recarga</b>	<b>Fator de permanência</b>
<b>Geomorfologia</b>	Altitudes, densidade de drenagem, comprimento e inclinação de rampas	Regiões topográficas de maior altitude e menor declividade	Constante
<b>Solos</b>	Condutividade hidráulica vertical da zona vadosa e sua espessura	Solos mais porosos, permeáveis e espessos que permitem uma maior taxa de infiltração	
<b>Clima</b>	Distribuição espacial e temporal da precipitação pluvial	Grande a de chuvas pouco intensas e curtas	Variável
<b>Cobertura do solo</b>	Percentual de cobertura vegetal nativa ou reflorestada	Presença de cobertura vegetal, em especial arbórea	

## **2.2. Os condicionantes do meio físico para o processo de urbanização e suas relações com as áreas de recarga**

O Processo de urbanização é um fenômeno de concentração que envolve o aumento da extensão e do número de focos populacionais. A escolha das áreas onde ocorrem esse processo envolve uma multiplicidade de fatores que se sobrepõe e que variam em diferentes tempos e locais. Estudos sociológicos e arqueológicos propõe que, entre diversos fatores, a escolha das áreas onde ocorrem esse processo está conectada principalmente com quatro questões: economia, proteção, cultura e meio ambiente (CARTER, 1977).

Economicamente, as cidades tendem a se localizar em pontos estratégicos para a potencialização da economia. Isso inclui pontos de cruzamento de importantes estradas e portos, para escoamento da produção de regiões próximas; e concentração de indústrias e serviços onde há mão de obra, demanda e recursos para o funcionamento dos mesmos (CARTER, 1977). Também, a origem das cidades está relacionada com a necessidade das pessoas de se protegerem. Nesse sentido, a escolha do local onde as cidades se localizam pode estar relacionada com características do sítio que permitem uma maior defesa, como locais de maior visibilidade e/ou de difícil acesso (CARTER, 1977). Ainda, fatores culturais possuem influência nessa escolha, sendo que aglomerações podem ocorrer em volta de locais considerados sagrados ou por questões políticas (CARTER, 1977).

Além desses fatores o meio ambiente e características do seu meio físico impõem algumas condicionantes às aglomerações populacionais. Essas condicionantes foram estudadas principalmente pela área do planejamento ecológico urbano, que, como visto, é o método que verifica a aptidão de áreas para certos usos a partir das características do meio físico do território. Alguns autores (HOUGH, 1984; MCHARG, 1969; MOTA, 1981) que trabalham esse método apontam como os principais fatores do meio físico à serem contemplados para a escolha de áreas propícias a urbanização: **(1) o clima; (2) a geomorfologia; e (3) os solos.**

A depender da altitude, longitude e continentalidade, as cidades apresentam diferentes climas. Os fatores climáticos que estão mais relacionadas ao conforto térmico

da população são: (1) a radiação solar; (2) a temperatura; (3) a velocidade e direção dos ventos; (4) a precipitação; (5) a umidade; e (6) as camadas atmosféricas (MOTA, 1981; BARBIRATO; TORRES; SOUZA, 2011). A temperatura do ar é geralmente maior nas cidades do que na área rural, apresentando em média registros de 0,5°C a 3°C a maiores (LANDSBERG, 1981). A umidade relativa, por absorver tanto a radiação solar quanto terrestre, exerce um grande efeito sobre a temperatura da ar e sobre o conforto humano e, em geral, é cerca de 6% menor na cidade do que no campo devido, principalmente ao incremento da temperatura e perda de vegetação (LANDSBERG, 1981). Essa massa construída também influencia a velocidade do vento, que acaba na maior parte das configurações urbanas, sendo menor do que nos arredores (LANDSBERG, 1981). Em adição, as camadas atmosféricas influenciam na qualidade do ar urbano, uma vez que suas possíveis inversões são fatores importantes relacionados com a dispersão de poluentes atmosféricos (MOTA, 1981).

Também, a presença de chuvas está relacionada a disponibilidade hídrica local, que tem sido um fator importante na localização das cidades, devido a importância desse recurso para o atendimento das necessidades biológicas básicas e outros usos, tais como: suprimento de indústrias, produção de energia, irrigação e recreação. A quantidade de chuva de uma área urbana depende fundamentalmente de seu clima natural, sendo pouco influenciada pela massa construída.

Da geomorfologia, o relevo é o fator que mais influencia a urbanização (MOTA, 1981). Por exemplo, terrenos com grandes declividades podem ser inapropriados à ocupação devido à problemas de instabilidade e dificuldade de mecanização. Inclusive, de forma a precaver situações de risco e impactos sobre a natureza a Lei Federal 6.766/79, em seu artigo 3º, estabelece um limite de declividade de 30% (15º) para o loteamento do solo urbano. Mas mesmo em declividades menores que 30%, como áreas situadas em vales dissecados e rebordos (declividades entre 20 a 30%), já se recomenda a ocupação de baixa densidade, com implantação de infraestrutura e técnicas adequadas à conservação dos solos. Nas áreas de rampas íngremes, caracterizadas por declividades acima de 30%, em função da declividade acentuada e da presença de solos mais rasos, recomenda-se manter intacta a cobertura de vegetação natural, e o uso mais adequado nestas localidades é voltado à conservação e à preservação ambiental.

O relevo também possui relações com as características climáticas, sendo que a ocorrência de inversões de temperatura, que podem contribuir para o agravamento da poluição do ar, é mais comum em vales. As áreas baixas geralmente estão associadas a alta densidade de drenagens naturais e estão mais sujeitas a inundações. E a altitude também influi para uma maior ou menor incidência de radiação solar, influenciando na temperatura (MOTA, 1981).

Os solos, também, podem influenciar decisivamente no tipo de ocupação de determinada zona. Por exemplo, a instabilidade em áreas de grande declividade, dependem da coesão do solo. Sendo que, quanto mais coeso o solo menos propício à deslizamentos. Ou seja, a viabilidade técnica de ocupação de encostas, depende, também, do tipo de solo presente (TANDY, 1972) (Tabela 2.2). A coesão do solo é a resistência pela qual o solo se torna capaz de manter sua forma, mesmo quando cortado ou moldado e possui muita influência na propensão à erosão, a depender da presença de cobertura vegetal e intensidade de chuvas (MOTA, 1981).

Além disso, o conhecimento do tipo de solos é fundamental para determinar as condições de desenvolvimento para plantações paisagísticas e agrícolas e para capacidade de suporte a obras civis. Para a engenharia civil o solo é um material sobre o qual são edificados os mais diversos tipos de obras, devendo estes apresentar propriedades que permitam sua sustentação. Para isso, diversos parâmetros geotécnicos devem ser observados como, permeabilidade, profundidade, resistência ao cisalhamento, colapsividade e resistência à carga compactada e saturada.

A resistência a cargas é determinada principalmente pelas características de coesão e compacidade do solo. A compacidade é um índice, para os solos mais grossos, que indica se as partículas sólidas estão organizadas mais próximas umas das outras, com conseqüente redução da porosidade (ALMEIDA, 2004). Essas características determinam a viabilidade e custo das fundações das construções, embora com a

**Tabela 2.2** – relação entre tipo de solo e grau de inclinação para ocupação de encostas. Fonte: (TANDY, 1972, p. 203)

<b>Tipo do solo</b>	<b>Inclinação</b>
<b>Solos não coesivos e cal</b>	35°-40°
<b>Rochoso</b>	45°
<b>Argila e silte molhado</b>	15°
<b>Areia seca e cascalho</b>	50°
<b>Argila seca</b>	35°
<b>Areia Húmida</b>	40°

tecnologia atual, não sejam um limitador. Em linhas gerais, as areias compactas e argilas rijas a duras profundas, que se estendam de forma homogênea pela área, representam solos melhores para fundações (com maior capacidade de suporte de carga e menos susceptíveis a deformações). Em

contrapartida, as argilas moles e areias fofas rasas representam solos menos resistentes para as fundações (com menor capacidade de suporte de carga e mais susceptíveis a deformações) (ALMEIDA, 2004). Entretanto, solos considerados com boas características para fundações, devido principalmente a compactação, acarretam em limitações ao desenvolvimento da arborização urbana, infiltração da água e capacidade de receber efluentes líquidos domésticos.

Em adição, solos encharcados de regiões pantanosas ou próximas a drenagens naturais, com lençóis freáticos muito altos, também são inadequados devido ao risco de inundações, contaminação e dificuldade de receber efluentes domésticos.

A partir da comparação desses fatores do meio físico relevantes ao processo de urbanização com os fatores do meio físico relevantes ao processo de recarga dos aquíferos pode-se inferir o grau de similaridade entre áreas propícias a ocupação urbana (sob o aspecto ambiental) e as áreas propícias a recarga.

Em relação ao clima, para uma maior recarga dos aquíferos é necessário que haja precipitações constantes, já que essa é a principal fonte natural desse processo. Enquanto, para urbanização é necessário que haja disponibilidade hídrica, o que não envolve apenas os padrões de precipitação, mas possui correlação com os mesmos, sendo necessário tanto maiores taxas de precipitação, quanto padrões geomorfológicos que permitam a armazenagem desse recurso.

Em relação a geomorfologia e aos tipos solos há muitas semelhanças entre os fatores condicionantes a formação de áreas propícias a recarga e a urbanização. Para os dois processos é importante a baixa declividade do terreno. Assim como, os solos arenosos, profundos e homogêneos possuem boas performances tanto para infiltração, quanto maior resistência a cargas do que solos argilosos, em linhas gerais. Somado a isso, a maior ocorrência dos solos com melhores características para a recarga e para a urbanização acontece em planaltos, que também são áreas mais propícias a recarga regional dos aquíferos como visto no item anterior (tabela 3).

**Tabela 2.3** – Relação entre os fatores do meio físico propícios a recarga de aquíferos e propícios a urbanização. Fonte: Própria autoria, 2018.

<b>Relações entre os fatores</b>			
<b>Caracterização necessária</b>	<b>Fatores relacionados à recarga</b>	<b>Fatores relacionados à urbanização</b>	<b>Relação entre os fatores</b>
<b>Geomorfologia</b>	Regiões topográficas de maior altitude e menor declividade (<20%)	Regiões topográficas de maior altitude e menor declividade (<30%)	Muito alta

<b>Solos</b>	Solos mais porosos, permeáveis e espessos que permitem uma maior taxa de infiltração	Solos mais compactos, permeáveis e espessos, que possuem ao mesmo tempo resistência a cargas e capacidade de absorção	Alta
<b>Clima</b>	Chuvas altas, frequentes e de curta duração	Temperaturas e umidades amenas, disponibilidade hídrica	Média
<b>Cobertura do solo</b>	Presença de cobertura vegetal, em especial arbórea	-	Não relacionada

### **2.3. Alterações na recarga dos aquíferos causadas pelo processo de urbanização**

As alterações geradas pela urbanização na recarga dos aquíferos são de dois tipos: (i) na quantidade, devido as alterações nas taxas de infiltração natural ou a partir de fontes artificiais de recarga; e (ii) na qualidade da água recarregada, devido a intrusão de contaminantes, de forma indireta, passando pela zona vadosa do solo e de forma direta, por meio de poços ou técnicas de infiltração artificial (FOSTER, STEPHEN; LAWRENCE; MORRIS, 1998).

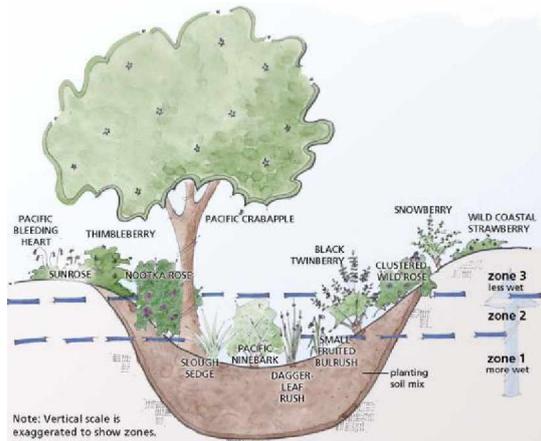
A recarga natural do aquíferos se dá por meio da chuva de acordo com os processos estudados no tópico anterior. Em áreas urbanizadas essas taxas normalmente são bastante reduzidas devido a drásticas reduções da taxa máxima de entrada da água no solo, causada pela utilização de superfícies impermeáveis, e devido a alterações na permeabilidade das primeiras camadas, causada por diferentes práticas de manejo, como veremos em mais detalhes no próximo capítulo. Essa condição associada a retirada de água dos aquíferos para abastecimento podem levar diminuição significativa do volume de água disponível e vazões dos poços. Essa redução do nível dos lençóis freáticos contribui também para diminuição da descarga de água nos corpos hídricos superficiais e nascentes. E pode, ainda, causar subsidência do solo, processo que afeta a estabilidade das construções, chegando a comprometer a estrutura em alguns casos.

Já a recarga artificial dos aquíferos que ocorre nas áreas urbanas pode ser separada em intencional e não intencional. E, em alguns casos, principalmente em cidades de clima árido ou semiárido ou onde a densidade e o consumo de água são muito altos, essa recarga artificial, principalmente de fontes não intencionais, pode parcialmente, ou até completamente, compensar o déficit da infiltração natural de água da chuva, causado pela impermeabilização do solo, aumentando a altura do lençol freático (FOSTER; MORRIS; LAWRENCE, 1994).

Por exemplo, Foster, Morris e Lawrence (1994) estimou que, em casos extremos, vazamentos não intencionais no subsolo podem ser equivalentes a 500 mm de chuva ao ano em áreas altamente povoadas. O problema desse aumento da recarga dos aquíferos por meio de processos artificiais não intencionais é que, na grande maioria dos casos, suas fontes acabam por introduzir contaminantes na água do subsolo.

Um elevado número de atividades humanas urbanas podem potencialmente poluir os aquíferos através de recargas não intencionais, mas apenas alguns são responsáveis pelos problemas mais graves (FOSTER; MORRIS; LAWRENCE, 1994). A gravidade da poluição causada não é diretamente proporcional ao tamanho da fonte, uma vez que as recargas prolongadas de pequenas operações poluentes podem também causar grandes impactos.

As principais fontes contaminadoras dos aquíferos por meio de recarga não intencionais nas cidades são: os (1) aterros antigos ou lixões, que foram construídas sem diretrizes adequadas e antes da separação de resíduos perigosos ser introduzida, sendo fontes de lixiviados; (2) tanques e as lagoas usados para tratar, evaporar ou armazenar resíduos líquidos, da drenagem municipal, industrial e mineira, que mesmo que sejam originalmente impermeáveis, quase todas desenvolvem algum vazamento, cuja magnitude depende do tipo e qualidade da construção e da qualidade da manutenção; (3) tanques subterrâneos usados para armazenar vários líquidos, mas na maioria das vezes gasolina, que geralmente desenvolvem vazamento devido a corrosão e conexões ruins, sendo que esse problema de poluição é exacerbado pelo fato de que os tanques de gasolina são amplamente distribuídos nas cidades, refletindo a demanda de combustível local e não a necessidade de locais ambientalmente adequados; (4) águas residuais, que podem escorrer de fossas sépticas, latrinas, encanamento de esgoto ou serem diretamente descarregadas em solos; (5) transporte de água contaminada em canais abertos e rios que recarregam aquíferos; (6) indústrias, principalmente as que lidam com resíduos tóxicos, como hidrocarbonetos, solventes orgânicos sintéticos, metais pesados, etc.; (7) locais de enterro de humanos e animais representam fontes de contaminação microbiológica de aquíferos, quando os caixões usados não são estanques (MARSALEK et al., 2013). Outros casos de recarga não intencionais dos aquíferos, mas que não representam problemas graves de contaminação, são provenientes do sistema de abastecimento de água e de drenagem das águas pluviais.



**Figura 2.6** - Ilustração de bacia de bioretenção.  
Fonte: HINMAN, 2012

que auxiliam na infiltração da água, são (HINMAN, 2012): (1) sistemas de infiltração, como células, trincheiras e cobertores de infiltração, que são buracos enterrados construídos para permitir a retenção da água e lenta infiltração da mesma no solo; (2) bacias de bioretenção ou jardins de chuva, que são pequenas depressões projetadas na paisagem com um mix de solo e plantas, incluindo árvores, arbustos e grama, que utilizam as propriedades químicas, biológicas e físicas das plantas, micróbios e solo para reter, infiltrar e remover poluentes da água; e (3) compostagem dos solos perturbados, uma vez que a matéria orgânica, juntamente com a vegetação, é capaz de fisicamente e quimicamente melhorar a estrutura e porosidade do solo.

A implementação dessas técnicas pode ser considerada tanto durante a elaboração do projeto de expansão urbana quanto em projetos de renovação ou requalificação urbana. Mas, para que seja possível a implantação da drenagem sustentável nas áreas urbanas é necessário que haja espaços livres para sua implantação. Nesse sentido, abordagem como o LID, WSUD e SuDS priorizam o controle de pequena-escala, ou seja o emprego de técnicas de tamanho reduzido o mais próximo possível da fonte de geração de excedente. Essa forma de implementação oferece oportunidades significativas para manter as funções hidrológicas de interceptação, infiltração e armazenamento em depressões, respeitando limitações locais de espaço físico, solo, declividade, nível do lençol freático e proximidade à fundações de edificações (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000). McHarg, Sutton e Spirm (1973) destacam ainda que os elementos de drenagem sustentável, que permitem a infiltração

Já a recarga artificial intencional dos aquíferos se dá principalmente a partir de técnicas de drenagem sustentável, que visam o aumento das oportunidades para retenção e infiltração da água da chuva a partir da conservação ou reabilitação de ecossistemas naturais e o desenvolvimento de técnicas que simulem os processos naturais em ecossistemas modificados. As principais técnicas de drenagem sustentável existentes,

de água no solo, devem ter sua implantação reforçada em áreas com solo de alta permeabilidade e capacidade de estoque.

Já existem vários casos que comprovam o sucesso da implementação dessas técnicas, à exemplo da cidade de Seattle (Washington, E.U.A.; KLOSS & CALARUSSE, 2006 apud SOUZA et al. 2012), onde um projeto-piloto de reconstrução da 2ª avenida (200m; Street Edge Alternative Street Project) ganhou grande reconhecimento por reduzir 99% do escoamento superficial (KLOSS & CALARUSSE, 2006 apud SOUZA et al. 2012) e promover ambiente mais convidativo à população, pelo plantio de 100 árvores e 1100 arbustos integrados à dispositivos de controle de águas pluviais.

No Brasil, um estudo preliminar (SOUZA et al. 2012) do impacto de adoção de dispositivos recomendados em manuais de LID (minimização de impermeabilização, biorretenções e valas de infiltração) em um condomínio (1,5 ha) em Porto Alegre sugere a possibilidade de controlar vazão de pico, volume e duração do escoamento para magnitudes observadas, quando da simulação numérica de um evento de precipitação de 1 hora e 10 anos de recorrência, sobre cobertura de floresta esparsa.

## **Síntese do capítulo**

As primeiras definições apresentadas sobre águas subterrâneas e aquíferos (zona vadosa, zona saturada e zona intermediária; capacidade de campo; aquíferos confinados e livres; formações intergranulares, fraturadas e cársticas; porosidade, permeabilidade, transmissividade e vazão) serviram para embasar o entendimento do processo de recarga e das funções e serviços ecossistêmicos desempenhadas pelos aquíferos. A relação entre esses conceitos e o processo de recarga está esquematizada no organograma a seguir:

Fases do processo de recarga	Onde Acontece	Características que favorecem	Serviços ecossistêmicos relacionados
Precipitação	Atmosfera	Regular e não torrencial	-
Escoamento superficial	Superfície do solo	Presença de vegetação e declividades suaves	regulação do escoamento superficial
Infiltração	Zona Vadosa ou de Aeração e Aquíferos Livres	Humidade, condutividade hidráulica e profundidade	regulação da qualidade da água
Armazenamento	Aquíferos Livres e Confinados	Vazão e padrões de fluxos (relevo)	provimento de água
Descarga	Corpos Hídricos superficiais	Vazão e padrões de fluxos (relevo)	regulação das vazões de águas superficiais

**Figura 2.7** - Relação entre o processo de recarga, distribuição da água, características do meio físico e biótico e funções ecossistêmicas. Própria autoria, 2018

Na análise do estudo de caso a pesquisa irá buscar nos condicionantes do meio físico (clima, geomorfologia, geologia) as características que favorecem a recarga, para por meio de técnica do planejamento ecológico de sobreposição das condicionantes, chegar as áreas mais propícias à recarga.

O capítulo também deixou claro as similaridades entre as características do meio físico que tornam as áreas propícias à recarga dos aquíferos e à urbanização. Essas semelhanças fazem com que em muitos casos essas áreas se sobreponham, aumentando a proporção do impacto da cidade sobre essa função ecossistêmica.

Foi visto também que os impactos gerados pela urbanização são: (1) de redução das taxas de infiltração natural da água chuva, que geram reduções da quantidade de água de qualidade subterrânea; e (2) recargas artificiais dos aquíferos por meio de processos intencionais e não intencionais, que na maior parte dos casos não compensam a redução das taxas naturais de infiltração de água da chuva, principalmente em climas úmidos; e (3) a intrusão de contaminantes no solo, que geram redução da qualidade da água subterrânea, principalmente por meio de processos de recarga artificiais não intencionais.

Esses processos alteram principalmente os serviços de regulação do escoamento superficial, das vazões de águas superficiais e do provimento de água, mas não os alteram de forma homogênea a depender do padrão morfológico de ocupação do solo que pode influenciar na infiltração da água solo e será estudado mais a fundo no próximo capítulo.

Também, percebe-se que impactos de redução das taxas de infiltração natural da água da chuva, estão mais diretamente relacionados com características de tipologias morfológicas de ocupação do solo (tipo e proporção da cobertura do solo), enquanto os impactos que envolvem a recarga artificial e intrusão de contaminantes no solo, estão mais diretamente relacionados com características da gestão da ocupação (qualidade da infraestrutura, monitoramento e fiscalização). Assim, o próximo capítulo da pesquisa irá focar nos padrões de ocupação do solo e sua relação com a alteração da taxa máxima de entrada da água no solo e da permeabilidade de suas primeiras camadas.

## **CAPÍTULO 03**

### **Elementos da forma urbana com implicações sobre a perda de infiltração natural das águas pluviais no solo**

Dadas as semelhanças entre as condicionantes físicas das áreas com alto potencial de recarga natural dos aquíferos e das áreas com alto potencial à urbanização entender como as formas de ocupação urbana podem levar a redução das taxas de infiltração da água chuva torna-se importante.

Sendo assim, esse capítulo explora, a partir de leituras bibliográficas, relações entre diferentes formas de ocupação urbana e a perda de infiltração natural das águas pluviais bem como, medidas de urbanização sensíveis ao ciclo da água, que contribuem para um menor impacto sobre a perda de infiltração. A partir dessa revisão, identificou-se os principais elementos configuracionais urbanos relacionados com a infiltração natural das águas pluviais e utilizá-los como instrumentos de identificação dos arranjos urbanos quanto ao seu potencial para uma maior ou menor perda de recarga dos aquíferos.

O capítulo se organiza em duas partes que: (1) aborda relações entre fatores das condições de manipulação do solo urbano e das medidas de urbanização com a infiltração natural das águas pluviais no solo urbano; e (2) trata sobre a compreensão dos elementos configuracionais dos espaços urbano relacionados com o potencial de infiltração da água no solo; com o objetivo de relacionar arranjos de parâmetros urbanos e suas implicações sobre o potencial de infiltração natural das águas pluviais no solo.

#### **3.1. Fatores relacionados com a infiltração natural das águas pluviais nas cidades**

O processo de urbanização resulta em alterações reconhecíveis na cobertura do solo, com consequentes alterações do regime hidrológico, de forma mais pronunciada, na interceptação, escoamento, infiltração, evaporação, evapotranspiração e recarga das águas subterrâneas. Por isso, a compreensão da relação entre a ocupação do solo e as alterações hidrológicas é um passo importante nas estratégias de manejo de bacias hidrográficas. No entanto, avaliar os impactos da ocupação do solo urbano nas respostas hidrológicas de bacias hidrográficas urbanizadas apresenta um grande desafio devido à

complexidade e heterogeneidade das formas urbana e da ligação forma-impacto hidrológico.

Historicamente, as avaliações das alterações hidrológicas em áreas urbanizadas têm sido feitas principalmente pela área da engenharia civil, com foco na modelagem do escoamento superficial da área, para com isso constituir medidas de drenagem. Nesse seguimento, os diversos modelos matemáticos disponíveis, utilizam o percentual de áreas impermeáveis como principal característica da ocupação urbana levada em consideração, para estimar o escoamento superficial.

Alguns exemplos desses modelos são: WetSpa – Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (LIU; SMEDT, 2004); SWAT – Soil and Water Analysis Tool (ARNOLD, J G et al., 2012; ROSSMAN, 2015); e SWMM – Storm Water Management Model (LEE; NIETCH; PANGULURI, 2017). Esses modelos estimam o impacto na quantidade e qualidade da água em determinados cenários. Os parâmetros utilizados para montar esses cenários podem ser separados em: (1) parâmetros naturais, relacionados com características da, vegetação, clima, geomorfologia e hidrogeologia, como declividade, localização e tamanho das drenagens naturais, profundidades dos aquíferos, presença de nitrato e fósforo no solo, umidade inicial do solo, radiação solar, temperatura, velocidade dos ventos, umidade do ar, intensidade e altura da chuva, condutividade hidráulica saturada e capacidade de campo do solo, tipos de cobertura vegetal natural, entre outros; e (2) parâmetros relacionados a antropização das áreas, medidos normalmente de acordo com o tipo de cobertura do solo onde são levados em consideração cenários urbanos de diferentes densidades construtivas / percentuais de áreas impermeabilizadas e a relação estatísticas entre a configuração dessas áreas e coeficientes de escoamento superficial (C), a exemplo do quadro a seguir, apresentado por Wilken (1978 apud. GAROTTI; BARBASSA, 2010):

**Tabela 3.1** – Valores de coeficiente de escoamento (C), conforme cenários de urbanização da bacia. Fonte: GAROTTI; BARBASSA, 2010 adaptado de WILKEN, 1978.

Zonas	Valores de C
<u>Muito alta densidade construtiva</u> : partes centrais densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas;	0,70 a 0,95
<u>Alta densidade construtiva</u> : partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas;	0,50 a 0,70
<u>Média densidade construtiva</u> : partes residenciais tipo cidade-jardim com muitas superfícies livres e ruas macadamizadas ou pavimentadas;	0,25 a 0,50
<u>Baixa densidade construtiva</u> : partes de arredores ou subúrbios apenas com algumas edificações;	0,10 a 0,25
<u>Muito baixa densidade construtiva</u> : partes rurais, áreas verdes, superfícies	0,05 a 0,20

Embora a avaliação da ocupação urbana pela quantidade de áreas impermeáveis possa ser suficiente para a gestão da drenagem urbana, para que se possa construir cidades mais sensíveis a manutenção da recarga dos aquíferos, a área do planejamento e projeto urbano, precisam entender outras nuances relacionadas aos impactos hidrológicos da ocupação do solo urbano, que vão além desse percentual. Esses detalhes podem permitir um manejo mais consciente dos parâmetros urbanísticos (densidade, taxa de ocupação, taxa de permeabilidades, entre outros) e instrumentos de gestão (descontos e acréscimos fiscais, entre outros).

Esta pesquisa irá explorar especificamente o impacto da forma de ocupação urbana na infiltração das águas pluviais, e consequente recarga dos aquíferos. Na procura por um maior entendimento da relação forma urbana-impacto hidrológico, esta seção irá explorar os principais fatores relacionados com a urbanização que levam a diminuição de infiltração natural da água e medidas de urbanização sensíveis a água.

### **3.1.1. Condições de manipulação do solo urbano com implicações sobre a infiltração natural das águas pluviais**

Como visto no capítulo anterior, a infiltração de chuva em superfícies permeáveis é controlada por três mecanismos: a taxa máxima possível de entrada da água através da superfície do solo, a taxa de movimento da água através da zona vadosa e a taxa de drenagem da zona vadosa para a zona saturada. A infiltração natural é significativamente reduzida nas áreas urbanas devido principalmente a fatores que afetam a taxa máxima possível de entrada da água, tempo de contato e características das primeiras camadas da zona vadosa.

Apesar de muito das alterações nas taxas de infiltração das águas da chuva serem atribuídas à menor disponibilidade de superfícies permeáveis e da consequente diminuição do tempo de contato da água com o solo, esse não é o único problema nas cidades. Mesmo superfícies compostas de materiais permeáveis possuem menores taxas de infiltração em áreas urbanas do que áreas naturais, devido condições de manipulação do solo urbano que alteram a permeabilidade natural do solo.

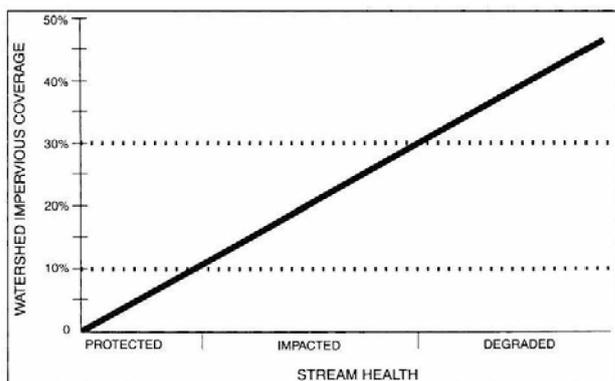
O estudo da bibliografia mais recente sobre o tema destaca como sendo as principais alterações causadas pela urbanização na taxa máxima possível de entrada da

água no solo: **(i) o selamento por superfícies impermeáveis** (BOOTH, 1991; FOSTER; MORRIS; LAWRENCE, 1994; ARNOLD; GIBBONS, 1996; MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001; ANDJELKOVIC, 2001; SHUSTER *et al.*, 2005; MARSALEK *et al.*, 2006; PITT *et al.*, 2009; JACOBSON, 2011); **(ii) a compactação** (GREGORY *et al.*, 2006; PITT *et al.*, 1999, 2003, 2009); e **(iii) a redução da cobertura vegetal arbórea** (AMARAL, 2015; ANDJELKOVIC, 2001; HAMILTON; WADDINGTON, 1999; HOUGH, 1984; KAYS, 1980; MARSALEK *et al.*, 2006).

**(i) Selamento do solo por superfícies impermeáveis**

O selamento do solo por meio das **superfícies impermeáveis** talvez seja o efeito mais visível urbanização na permeabilidade do solo urbano. Os processos de selamento da superfície do solo incluem as áreas onde se encontram localizadas as edificações e as áreas pavimentadas com materiais impermeáveis, como calçadas, vias, ruas, estacionamentos, pátios, pistas de aeroporto, etc. Em adição, superfícies permeáveis podem ser afetadas por acúmulo de camadas de poluentes de escoados, partículas de argila e silte ou lodo (PITT *et al.*, 2009)

O impacto das superfícies impermeáveis nas áreas urbanas, não são apenas na diminuição da capacidade da área de infiltração da água da chuva, com consequente diminuição dos aquíferos e vazão dos rios perenes. O caminho percorrido pela água escoada também é profundamente alterado. Os canais naturais de escoamento são modificados pelos corredores de transporte e substituídos por canos artificiais, que aumentam a eficiência hidráulica de velocidade do escoamento. Esse processo começa com o escoamento superficial nas cabeceiras da bacia e progride até os rios receptores, que muitas vezes também são canalizados para aumentar sua capacidade hidráulica e proteger seus leitos contra a erosão. Sendo que, além da redução da infiltração da água, a urbanização contribui para o aumento da velocidade de escoamento, a redução resultante do tempo de resposta da captação, picos de escoamento mais elevados, contaminação da água e formação de enchentes (BOOTH, 1991; MARSALEK *et al.*, 2006; SHUSTER *et al.*, 2005).



**Figura 3.1** - relação entre porcentagem de superfícies impermeáveis e saúde do regime hídrico. Fonte: Arnold; Gibbons, 1996.

áreas de muita baixa densidade, e postularam que isso era devido à área impermeável não ter excedido um limiar de 20%. Enquanto, Booth e Jackson (1997) afirmam que há um acúmulo de efeitos prontamente mensurados a partir de 10% de área coberta por superfícies impermeáveis. Já, Yang et al. (2010) sugeriram que 3 à 5% de área de superfície impermeável é o limiar, além do qual os efeitos de urbanização começam a ter efeitos negativos no regime hidrológico. Ou seja, podemos concluir que mesmo taxas muito baixas de selamento do solo já são capazes de perturbar o meio ambiente.

A média da proporção de superfícies impermeáveis em áreas de desenvolvimento residenciais de baixa densidade em geral não abrangem mais de 20% do total de área ocupada (ARNOLD; GIBBONS, 1996; MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001), sendo que a malha viária é a principal responsável pelo total dessas superfícies, causando aumento de volume e carga de poluentes de origem difusa (PSAT & WSU 2005). Enquanto em áreas mais densamente povoadas e em distritos comerciais ou industriais, esta proporção pode atingir entre 60% à 80% de toda a área ocupada (ARNOLD, CHESTER L.; GIBBONS, 1996; FOSTER; MORRIS; LAWRENCE, 1994; MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001), sendo que os telhados e estacionamentos são os maiores contribuintes desse total e responsáveis pelo acúmulo de poluentes de deposição atmosférica e emissões veiculares (PSAT & WSU 2005).

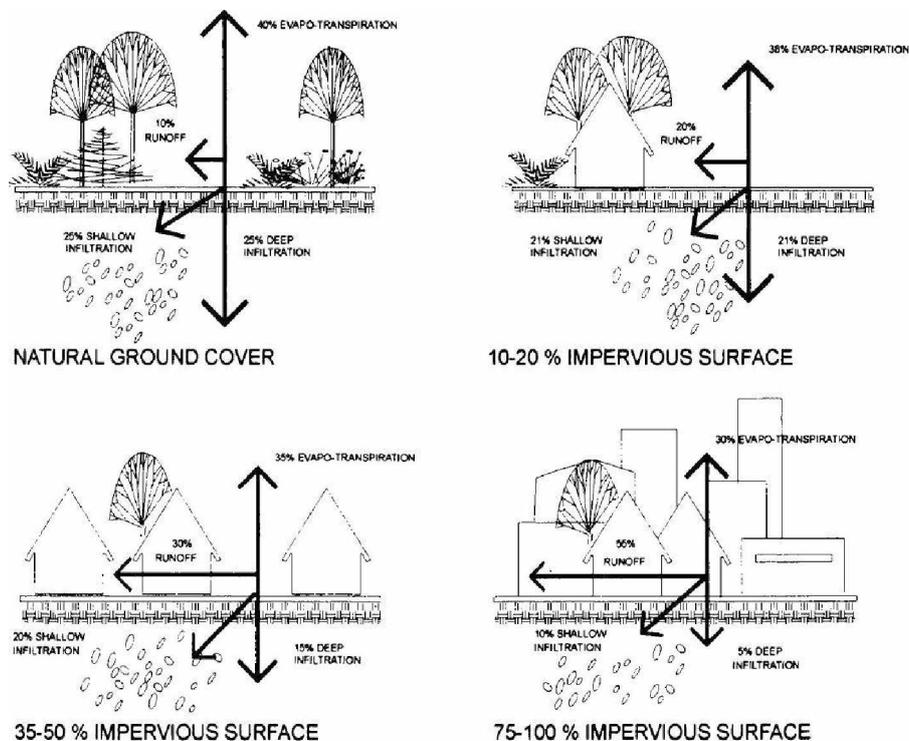
Além do total coberto pelas superfícies impermeáveis, detalhes sobre sua distribuição, extensão, conexão e localização, são importantes, uma vez que nem toda a área urbana selada possui o mesmo comportamento hidrológico. Uma maneira, utilizada em muitos estudos, de integrar alguns desses detalhes à medida geral de cobertura da área impermeável na bacia é a separação dessa área em **direta e indireta**. As áreas de superfícies impermeáveis classificadas como **diretas** são aquelas que são diretamente

Alguns autores, colocam a existência de um nível limiar de urbanização abaixo do qual as mudanças nas respostas hidrológicas das captações não são aparentes (JACOBSON, 2011). Brun e Band (2000) encontraram em sua pesquisa apenas mudanças muito pequenas na taxa de escoamento ocorridas em

conectados com a rede de drenagem construída (ruas e estacionamentos com sistemas de drenagem encanado), enquanto a área impermeabilizada **indireta** é aquela que escorre em direção a superfícies permeáveis ou semipermeáveis (telhados e pavimentações para pedestres, que escorrem para áreas vegetadas) (JACOBSON, 2011; SHUSTER *et al.*, 2005).

Essas duas áreas não causam o mesmo impacto na infiltração e escoamento da água da chuva. A água que cai sobre áreas impermeabilizadas diretas é rapidamente evacuada da área urbana e levadas para estações de tratamento e/ou corpos hídricos superficiais, diminuindo a oportunidade para infiltração, enquanto a água que cai sobre as áreas impermeabilizadas indiretas pode escorrer até áreas de superfície permeável, canais de escoamento naturais e corpos hídricos próximos, contribuindo indiretamente para a infiltração natural da água da chuva.

Apesar das superfícies impermeáveis diretas constituírem uma fonte significativa de escoamento, sendo que alguns estudos demonstram que as áreas ocupadas por elas podem chegar a mais de 50% do total da área urbana (SHUSTER *et al.*, 2005), sua extensão normalmente não é regulada pelos zoneamentos municipais, que em geral regulam apenas as superfícies impermeáveis que encontram-se dentro dos lotes (ARNOLD, CHESTER L.; GIBBONS, 1996).



**Figura 3.2-** mudanças no ciclo hidrológico devido ao aumento de superfícies impermeabilizadas. Fonte: Environmental Protection Agency, 1993 apud Arnold; Gibbons, 1996.

Em relação à predição do aumento do escoamento ou diminuição da infiltração de acordo com o percentual de áreas impermeáveis, embora exista relação de causa impacto, os estudos não são conclusivos. Alguns autores (HOUGH, 1984; MOTA, 1981) e modelos matemáticos fazem correlações diretas entre percentual de superfícies impermeáveis e parâmetros hidrológicos, a partir de relações estatisticamente significativas entre a condição do escoamento e a área total impermeável; obtendo que, em condições gerais, para áreas naturais, cerca de 50% da água da chuva infiltra no solo e em áreas urbanas de alta densidade construtiva esse valor pode ser reduzido para 15% (ver figura 3.2).

Por exemplo, a fórmula de cálculo da infiltração Curva-número (CN), utilizado no SWAT, SWMM e muitos outros modelos, desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo e Recursos Naturais dos Estados Unidos, estabelece diferentes valores para a curva-número de infiltração da água (CN) que variam de 0 (solo muito permeável) até 100 (solo completamente impermeável) de acordo com cenários de ocupação do solo. O valor de CN nesse modelo depende, além do tipo de superfície e uso do solo, das condições antecedentes de umidade, podendo variar entre: (i) solos secos; (ii) solos cuja umidade corresponde à capacidade de campo; e (iii) solos quase saturados (SWAT, 2009; GONÇALVEZ, 2012). Em relação às características hidrológicas do solo que podem variar entre: (a) solos com alta taxa de infiltração, superior a 7,62mm/h, como areias e cascalhos; (b) solos com moderada taxa de infiltração, que varia entre 3,81 e 7,62 mm/h; (c) solos com baixa taxa de infiltração, que varia entre 1,27 e 3,81mm/h; e (d) solos com muito baixa taxa de infiltração, inferior a 1,27 mm/h (ver tabela 1) (SWAT, 2009; GONÇALVEZ, 2012).

**Tabela 3.2** - Valores de CN para áreas urbanas em condição de umidade antecedente ii e para os quatro tipos hidrológicos de solo (SCS Engineering Division, 1986 apud SWAT, 2009 e GONÇALVEZ, 2012)

Tipo de cobertura do solo em áreas urbanas	Valores de CN			
	Alta TI	Moderada TI	Baixa TI	Muito Baixa TI
Espaços abertos (gramados, parques, campos de golfe, cemitérios, etc.) com menos de 50% de grama*	68	79	86	89
Espaços abertos com 50 a 75% de grama*	49	69	79	84
Espaços abertos com mais de 75% de grama*	39	61	74	80
Superfícies impermeáveis (estacionamentos, estradas, telhados, calçadas)	98	98	98	98
Estradas e calçadas pedregulhadas	76	85	89	91
Estradas e calçadas de terra	72	82	87	89
Zonas comerciais com 85% de superfícies impermeáveis	89	92	94	95
Zonas industriais com 75% de superfícies impermeáveis	81	88	91	93
Zonas residenciais com lotes de 500m <sup>2</sup> e 65% de superfícies	77	85	90	92

impermeáveis				
Zonas residenciais com lotes de 1000m <sup>2</sup> e 38% de superfícies impermeáveis	61	75	83	87
Zonas residenciais com lotes de 1300m <sup>2</sup> e 30% de superfícies impermeáveis	57	72	81	86
Zonas residenciais com lotes de 2000m <sup>2</sup> e 25% de superfícies impermeáveis	54	70	80	85
Zonas residenciais com lotes de 4000m <sup>2</sup> e 20% de superfícies impermeáveis	51	68	79	84
Zonas residenciais com lotes de 8000m <sup>2</sup> e 12% de superfícies impermeáveis	46	65	77	82
Área recentemente urbanizada, mas ainda sem construções (somente solo exposto, sem vegetação) *	77	86	91	94

\*ver itens compactação do solo e redução da cobertura vegetal arbórea.

Entretanto, outros autores que realizaram testes de campo perceberam que essa correlação entre tipos de cobertura do solo e taxas de infiltração ou escoamento pode não ser tão clara (BRUN; BAND, 2000; JACOBSON, 2011). Church et al. (1999) concluiu que o escoamento não acompanha necessariamente um aumento na superfície impermeável, sugerindo que: pode haver um nível de limiar acima do qual aumentos adicionais na superfície impermeável não são refletidos na taxa de escoamento; e que não existe um coeficiente de escoamento universal que possa ser usado para prever o coeficiente de escoamento.

Essa variação entre as taxas de infiltração e superfícies impermeáveis pode ter relação com variáveis hidrológicas não consideradas pelos modelos, como por exemplo a consideração da conectividade das áreas impermeáveis (diretas e indiretas), sendo que áreas mais desconectadas, de forma geral, possuem maior oportunidades para infiltração da água no solo (SHUSTER *et al.*, 2005).

Somado às altas complexidades de fatores envolvidos no processo de infiltração da água em áreas urbanas, existe uma grande falta de dados disponíveis para as análises. Especificamente, as taxas de impermeabilização e suas características específicas são difíceis de serem medidas com precisão e muitas têm sido as metodologias adotadas para quantificação e estimativa deste parâmetro. Lee e Heaney (2003) realizaram um estudo sobre o impacto da estimativa da impermeabilização e suas características nas modelagens do sistema de drenagem urbana. A quantificação das áreas impermeabilizadas foi separada em relação a sua conexão com a rede em direta e indireta e detalhada em cinco níveis de exatidão: (1) estimativa a partir de outros parâmetros urbanos, como a densidade demográfica, referenciados na literatura; (2) utilizando GIS, toda as ruas, calçadas, estacionamentos e prédios, foram classificados como impermeáveis (3) utilizando GIS, todas as áreas impermeáveis isoladas foram

consideradas indiretas; (4) as ruas, calçadas e estacionamentos são visitados e é verificada sua conexão com a rede de drenagem; (5) as saídas das calhas dos telhados são investigadas quanto sua conexão com as áreas permeáveis diretas. Esse detalhamento foi aplicado a uma área residencial de 5,81 hectares em Boulder, Colorado, EUA. Os resultados mostraram uma diferença nas vazões de pico modeladas da ordem de 265%, de acordo com o tipo de estimativa da impermeabilização medida. Segundo os autores, esses resultados sugerem a necessidade de aferir as áreas permeáveis diretas em estudos dos efeitos da urbanização sobre a qualidade e aumento do escoamento superficial.

Mas, apesar das dificuldades de aferição, sabe-se que as superfícies impermeáveis possuem um papel muito relevante na perda de infiltração natural da água da chuva e influenciam diretamente o aumento de escoamento superficial, mesmo em baixas proporções.

#### **(ii) Compactação do solo**

Além da distribuição das superfícies impermeáveis, a compactação do solo possui grande impacto sobre a infiltração natural das águas urbanas. As atividades associadas com o desenvolvimento inicial de uma área urbana, como importação de solos para canteiro de obras e posterior compactação e ruptura de sua estrutura durante operações cortes e terraplanagem e a forma como são feitas as fundações, são os principais motivos da compactação do solo urbano, sendo extensamente distribuídos por toda a cidade (PITT *et al.*, 1999, 2009). Em empreendimentos convencionais, que não



**Figura 3.3** - Exemplo de canteiro de obras 'limpo' e terraplanado. Fonte: <http://evotto.com.br>

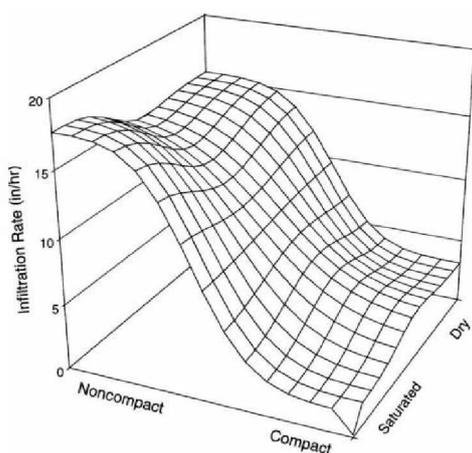
adotam técnicas de perturbação mínima do solo, grande parte dos lotes, se não todos, é desmatada, aplainada e posteriormente gramada (ver figura 3.3) (HINMAN, 2012). Nesse tipo de manejo, é possível assumir que durante o período de construção as áreas que foram desmatadas se tornam

compactadas, tanto pelas atividades de movimentação de terra quanto pela passagem de maquinários pesados e, mesmo com a presença de gramíneas, terão taxas de infiltração bastante reduzidas (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973).

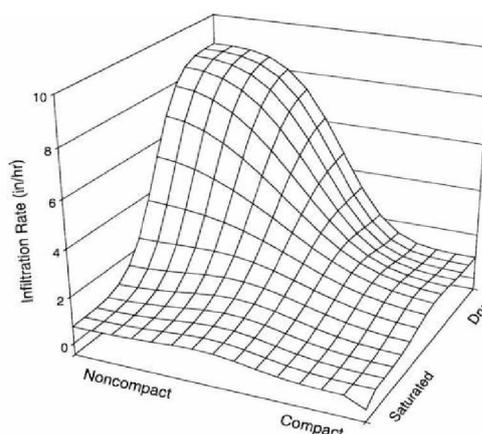
Em adição, muitas atividades urbanas cotidianas, que ocorrem após a conclusão do processo de construção, contribuem para a compactação do solo, a exemplo de: estacionar carros na grama, jogos em campos gramados e pessoas passeando a pé, entre outras (PITT *et al.*, 2009).

A compactação afeta as propriedades físicas do solo, diminuindo significativamente a porosidade de suas primeiras camadas. Essa mudança afeta a maneira como o ar e a água se movem, levando à uma baixa da permeabilidade. A compactação no solo urbano pode inclusive, em alguns casos, dificultar a penetração das raízes, acabando por atrofiar o crescimento de vegetações (GREGORY *et al.*, 2006; PITT *et al.*, 2003, 2009).

Estudos demonstram que a compactação pode reduzir a taxa de infiltração de solos arenosos, em média, 6 vezes e meia, sendo que o teor de água inicial no solo possui menores efeitos na taxa de infiltração nesses solos (PITT *et al.*, 1999, 2003, 2009) (ver figura 3.4). Enquanto, a infiltração em solos argilosos são afetados grandemente tanto pela compactação quanto pelo teor de água inicial, podendo rapidamente reduzirem em até 11 vezes essas taxas e se aproximar de zero (PITT *et al.*, 1999, 2003, 2009) (ver figura 3.5).



**Figura 3.4** - Efeito da compactação e da umidade em solos arenosos. Fonte: PITT *et al.*, 2009



**Figura 3.5** - Efeito da compactação e da umidade em solos argilosos. Fonte: PITT *et al.*, 2009

Entretanto, diferentemente dos estudos sobre superfícies impermeáveis, os estudos que ligam a compactação do solo e a perda de permeabilidade ainda não utilizam relações estatisticamente significativas para propor valores gerais de perda de permeabilidade do solo urbano, devido à compactação. O que se percebe a partir dos estudos pontuais é que a perda de permeabilidade pela compactação varia a depender do tipo de solo (mais argiloso ou arenoso) e do tipo de compactação sofrida (PITT *et al.*, 1999). O estudo de GREGORY *et al.* (2006), por exemplo, demonstra que a compactação causada por equipamentos leves (como carros), que ocorrem no dia a dia da cidade, influencia menos a infiltração do que aquela causada por equipamentos pesados (caminhões e tratores), que ocorrem geralmente na fase de construção e em zona industriais.

Existe, ainda, uma expectativa de que a compactação do solo urbano diminua com o tempo desde que foi perturbado (PITT *et al.*, 1999). Ou seja, que em novos empreendimentos, os solos compactos sejam dominantes, com infiltração muito reduzida em comparação com as condições anteriores à construção. Enquanto, em áreas onde a perturbação do solo urbano ocorreu a muito tempo, o solo poderia ter recuperado parte de sua capacidade de infiltração devido ao desenvolvimento de estruturas radiculares e insetos do solo ou outros animais de escavação.

Entretanto estudos realizado pela Universidade de Wisconsin (PITT *et al.*, 1999) indicaram que essa recuperação natural do solo ocorre apenas quando o solo não sofre novas perturbações por atividades diárias ou obras. E que, mesmo nesses casos, são necessárias várias décadas para que os solos compactados se recuperem para condições similares às condições de pré-desenvolvimento.

### **(iii) Redução de cobertura vegetal arbórea**

Conjuntamente com a perturbação do solo, a substituição da vegetação nativa, principalmente do porte arbóreo, por gramíneas ou por solo exposto, é outro fator de grande influência sobre a permeabilidade do solo urbano. Como visto no capítulo anterior, a capacidade de infiltração da maioria dos solos é consideravelmente menor na ausência de cobertura vegetal arbórea (AMARAL, 2015; MARSALEK *et al.*, 2006). Principalmente durante tempestades excepcionais e em áreas urbanas perturbadas, esses solos desmatados produzem volumes de escoamento superficial que podem se aproxima ao de áreas impermeabilizadas (HOUGH, 1984; MARSALEK *et al.*, 2006).

Isto é, as áreas arborizadas possuem influência sobre a manutenção da quantidade e qualidade da água e prevenção de enchentes. Seus sistemas radiculares são capazes de aumentar a permeabilidade do solo aumentando a infiltração da água, enquanto por meio de seu próprio consumo e da evapotranspiração elas diminuem consideravelmente o volume de água que escoam superficialmente. Relatório técnico desenvolvido pela Unesco em 2008 indica que o percentual de área florestal de uma bacia impacta diretamente a quantidade de água subterrâneas disponíveis localmente (WAGNER; MARSALEK; BREIL, 2008).

Um estudo de Kays (1980), por exemplo, demonstra o impacto da perturbação do solo e do desmatamento em uma microbacia quase completamente ocupada por áreas residenciais com baixa taxa de ocupação. A área do estudo era coberta por apenas 27,1% de coberturas impermeáveis, entretanto a maior parte da vegetação nativa existente havia sido removida e substituída por gramados e algumas novas árvores e grande parte do solo havia sido perturbado. Isso fez com que as taxas de infiltração se reduzissem em até 30 vezes, em comparação com área florestal remanescente. Sendo que quatro tipos diferentes de áreas ditas permeáveis (áreas gramadas) apresentaram taxas de infiltração menores do que 1,25cm/h. Podendo-se concluir, a partir das amostras de campos, que na realidade a área possui cerca de 67% de sua área coberta por superfícies impermeáveis de muita baixa infiltração (ver tabela 3.3). Outro estudo realizado por Hamilton e Waddington (1999) em áreas urbanizada gramadas na Pensilvânia, sem considerar a perturbação do solo, demonstrou que as taxas de infiltração dessas áreas não ultrapassam 10cm/h, podendo chegar até 0,4cm/h.

Tabela 3.3 - Apresentação dos resultados do estudo de Rays (1980)

Tipo de ocupação		% ocupada da bacia	Taxa média de infiltração (cm/h)
Superfícies permeáveis	Floresta de pinheiros de meia idade, com ninhadas de folhas	2,6%	31,56
	Área sobre anterior floresta de pinheiros, com baixa perturbação do solo, gramados e grandes árvores preservadas	23,8%	11,20
	Área sobre anterior campo de cultivo, com baixa perturbação do solo, gramados e novas árvores	9,1%	4,78
	Área sobre anterior campo de cultivo com arado, com baixa perturbação do solo, gramados e poucas árvores	8,7%	0,70
	Alta perturbação do solo por terraplanagem, gramados e poucas novas árvores	7,1%	1,25
	Alta perturbação do solo por cortes, gramados e poucas novas árvores	15,1%	0,67
	Alta perturbação do solo por cortes e terraplanagem, gramados e nenhuma árvore	4,7%	0,45
	<b>Superfícies impermeáveis</b>	27,1%	-

Um estudo realizado por Kelling e Peterson (1974) procurou demonstrar que as diferenças de infiltração entre diferentes áreas urbanas gramadas com o mesmo tipo de solo devem-se principalmente à compactação do solo. A partir desse estudo (KELLING; PETERSON, 1974) pode-se concluir que não só as áreas com gramíneas apresentam naturalmente menores taxas de infiltração do que áreas com extrato arbóreo, mas que no meio urbano essas áreas encontram-se normalmente associadas à áreas onde houve uma perturbação e consequente compactação do solo urbano e onde há um menor potencial para recuperação dessa compactação. Além de as espécies gramíneas possuírem naturalmente uma taxa máxima de entrada da água no solo menor que espécies arbóreas, elas exercem um papel menos significativo na recuperação da permeabilidade dos solos compactados, já que suas raízes são pouco profundas, não permitindo uma maior interação com o solo compactado.

Entretanto é importante ressaltar que embora uma maior cobertura vegetal arbórea esteja sempre associada com uma maior infiltração natural da água, uma grande quantidade de indivíduos arbóreos pode representar uma reduzida recarga dos aquíferos devido a quantidade de água consumida pelas árvores. Um estudo de Ilstedt et al. (2016) demonstra que para otimizar a recarga dos aquíferos a cobertura arbórea deve variar entre 12 a 50% a depender da distância entre os indivíduos arbóreos, mas que mesmo além dessa quantidade a recarga se mantém maior do que em cenários sem árvores.

A partir desses fatores, pode-se concluir que a impermeabilização do solo urbano é uma condição associada à maioria dos solos da mancha urbana, não associada apenas a áreas cobertas por superfícies impermeáveis *stricto sensu*. Ela depende conjuntamente das propriedades hidráulicas do solo, de sua profundidade e de seu teor inicial de água, como visto no capítulo anterior e do percentual de áreas totalmente impermeáveis, grau de compactação do solo e seu desmatamento (ver tabela 3.4).

**Tabela 3.4** – Fatores relacionados com a perda de infiltração natural da água das chuvas nas cidades. Própria autoria, 2018.

<b>Condições que diminuem a infiltração</b>	<b>O que caracteriza</b>	<b>Como afeta</b>	<b>Como analisar</b>
<b>Selamento do solo por superfícies impermeáveis</b>	(1) Áreas edificadas; (2) Áreas pavimentadas com materiais impermeáveis (calçadas, ruas, estacionamentos)	(1) Reduz a zero a taxa de entrada da água no solo (2) Altera os padrões de escoamento, com aumento do pico de volume, velocidade e contaminação	(1) Verificar total de áreas impermeáveis (2) Separar as áreas impermeáveis em diretas e indiretas
<b>Compactação do</b>	(1) Solos que foram	(1) Diminuí a porosidade	(1) Verificar o total

<b>solo</b>	<p>perturbados durante a construção com cortes, terraplanagem, passagem de máquinas pesadas e construção de fundações</p> <p>(2) Atividades cotidianas, como andar e estacionar carros, andar a pé e jogos em campos</p>	<p>das primeiras camadas do solo diminuindo a taxa de infiltração em até 6 vezes em solos arenosos e 11 vezes em solos argilosos, podendo aproximar-se de 0.</p> <p>(2) O solo fica mais suscetível a diminuição da taxa de infiltração devido o teor de água inicial</p> <p>(3) Dificulta o desenvolvimento de plantas</p>	<p>de áreas compactadas: considerar todas as áreas numa zona no entorno de construções e ruas; considerar solos que foram desmatados e gramados; considerar áreas de alta movimentação de pessoas</p>
<b>Redução da cobertura vegetal arbórea</b>	<p>(1) Desmatamento da vegetação natural, principalmente as árvores</p> <p>(2) Substituição da vegetação natural por grama</p>	<p>(1) Diminuí a taxa de infiltração a depender da anterior perturbação do solo entre 3 (sem perturbação) e 30 vezes (com perturbação), podendo se aproximar de 0.</p> <p>(2) Não auxilia na recuperação da compactação do solo</p>	<p>(1) Verificar total de área ocupada por indivíduos arbóreos na malha urbana</p>

### 3.1.2. Medidas de urbanização sensíveis a infiltração de água no solo

Novas abordagens para lidar com o ciclo da água em paisagens urbanas surgiram em diferentes locais do mundo desde meados da década de 1970. Essas abordagens adotam uma visão holística e têm como objetivo integrar o uso e ocupação da terra ao manejo da água, fornecendo uma gama de soluções para reduzir o impacto do volume, frequência e qualidade da drenagem de águas pluviais, por meio de medidas de preservação do sistema natural de drenagem existente, simulação do sistema natural de infiltração nas áreas antropizadas e proteção do solo durante processos de urbanização (ANDJELKOVIC, 2001; BROWN; KEATH; WONG, 2009; SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

Com o intuito de buscar orientações para um desenho urbano de menor impacto à infiltração natural das águas pluviais esta seção investigou manuais e documentos diretivos das abordagens que segundo Andjelkovic (2001), Andrade (2014), Souza, Cruz e Tucci (2012) mais avançaram nesse sentido:

- **McHarg, Schueler e Urbonas** – Ian Mcharg (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973; MCHARG, 1969), Tomas R. Schueler (SCHUELER, 1987) e B. Urbonas (URBONAS, 1994) são pesquisadores muito citados nas demais pesquisas estudadas que tratam do tema do desenho urbano sensível a água e implementação de práticas de drenagem urbana sustentável.
- **International Hydrological Programme (IHP)** – Programa hidrológico da United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – Unesco que já publicou, entre 2007 e 2010, uma série de sete relatórios sobre a água no ambiente urbano, chamada Urban Water Series<sup>6</sup> e uma série de manuais técnicos sobre drenagem urbana, em 2001, chamados Urban drainage in specific climates<sup>7</sup> e Guidelines on non-structural measures in urban flood management<sup>8</sup> (ANDJELKOVIC, 2001; MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001). Além do IHP, a Unesco faz parte das agências que compõe a UN-Water, programa da ONU que coordena trabalho sobre água e saneamento e que publicam anualmente, desde 2014, relatórios sobre o estado, gestão e uso da água mundialmente<sup>9</sup>. Sendo que o último relatório da UN-Water lançado em 2018 possui como tema as soluções baseadas na natureza - SbN como forma de gestão da água (WWAP, 2018).
- **Low impact Development (LID)** - O LID surgiu na década de 80 como uma estratégia de manejo de águas urbanas desenvolvida pela Agência de Proteção Ambiental Americana - US-EPA (EPA, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2000) por meio de planejamento e desenho urbano integrados a práticas de retenção, infiltração e tratamento da água em pequena escala e conservação e aproveitamento de características naturais de solo e vegetação. O objetivo principal do LID é permitir o completo

---

<sup>6</sup> A série sobre a água no ambiente urbano da Unesco é composta por sete relatórios que abordam os temas: (2007) processos e interações do ciclo da água urbano; (2007) dados necessários para uma gestão integrada da água urbana; (2007) gestão, ciência, política e prática para habitat aquáticos urbanos sustentáveis; (2009) gestão de riscos da água urbana; (2009) gestão integrada da água urbana em regiões áridas e semiáridas; (2010) gestão integrada da água urbana em trópicos úmidos; e (2010) simulações e modelagens avançadas para gestão da água subterrânea. Fonte: <http://unesdoc.unesco.org/images/0019/001910/191066e.pdf>

<sup>7</sup> <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001228/122848eo.pdf>

<sup>8</sup> <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001240/124004e.pdf>

<sup>9</sup> Os relatórios anuais abordam temas específicos sendo que desde de 2014 já foram abordados os seguintes temas: (2014) água e energia; (2015) água para um mundo sustentável; (2016) água e empregos; (2017) águas residuais, um recurso à disposição; e (2018) soluções baseadas na natureza para a gestão da água. Fonte: [http://www.unwater.org/publication\\_categories/world-water-development-report/](http://www.unwater.org/publication_categories/world-water-development-report/)

desenvolvimento urbano enquanto mantendo as funções hidrológicas essenciais da área. Isso é alcançado a partir de uma série de passos complementares, que começam com a mitigação de impactos a partir do projeto de ocupação da área e com a provisão de sistemas de controle dos distribuídos pela área urbana, com foco na origem do excesso de escoamento (HINMAN, 2012; PRINCE GEORGES COUNTY, 2000).

- **Water Sensitive Urban Design (WSUD)** – O WSUD surgiu e procura integrar a gestão do ciclo da água ao planejamento e desenho urbano, com o objetivo de imitar e proteger os sistemas naturais relacionados a água nos ambientes urbanos (KIAMA MUNICIPAL COUNCIL, 2005; NUNES *et al.*, 2012; MELBOURNE WATER, 2014). Essa abordagem é mais holística que procura minimização das superfícies impermeáveis, maximização de reutilização da água, diminuição do consumo redução do despejo de esgoto e águas de drenagem em corpos hídricos e incorporação de técnicas de retenção, infiltração e tratamento da água da chuva que simulam sistemas naturais. O WSUD ainda ressalta a oportunidade de obter múltiplos (visual, recreativo, etc.) benefícios através da gestão sustentável da água urbana.
- **Sustainable Drainage Systems (SuDS)** – O SuDS é uma abordagem inglesa com maior foco nas técnicas de retenção, infiltração e tratamento da água que simulam os sistemas naturais, cobrindo detalhadamente conceitos que envolvem seu planejamento, projeto, construção e manutenção, além das contribuições de cada técnica para a manutenção da quantidade e qualidade da água, biodiversidade e outras amenidades como lazer e estética (BALLARD *et al.*, 2015).

Essas diferentes abordagens definem estratégias de urbanização para mitigar a perda infiltração natural de água da chuva e aumento do escoamento nas cidades. Essas estratégias definidas nos manuais estudados se direcionam principalmente à quatro elementos do tecido urbano: (1) áreas de preservação; (2) espaços livres de uso público; (3) lotes; e (4) rede viária; que serão detalhados a seguir.

#### **(i) Áreas de preservação**

A mitigação da perda de infiltração natural e integração das funções hidrológicas ao processo de projeto começa com a identificação, preservação e recuperação de áreas sensíveis à manutenção dessas funções. Sistemas naturais que oferecem importantes

funções hidrológicas incluem (HINMAN, 2012; PRINCE GEORGES COUNTY, 2000; ANDJELKOVIC, 200; MELBOURNE WATER, 2014): (1) áreas florestadas, tanto as de grande porte, quanto as de pequeno porte presentes dentro de estruturas urbanas consolidadas; (2) corpos d'água e suas zonas de amortecimento; (3) zonas úmidas naturais; (4) solos de alta permeabilidade e capacidade de armazenamento; e (5) canais naturais de drenagem.

Nesse sentido, no que tange a urbanização que garanta a integridade dos sistemas naturais associados as funções hidrológicas, essa deveria manter um maior percentual de áreas florestadas, zonas úmidas naturais e solos de alta permeabilidade e capacidade de armazenamento. Para isso é necessário preservar grandes remanescentes de vegetação nativa e prevenir o desmatamento desnecessário pequenas áreas florestadas intraurbanas à implantação de edificações, (ANDJELKOVIC, 2001). Em relação aos canais de drenagem natural, quando possível é importante preservá-los e manter sua capacidade de lidar com o escoamento definindo margens preservadas com suas áreas de amortecimento desocupadas. Segundo McHarg, Sutton e Spirn (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973) deveriam ser mantidos em suas condições naturais um mínimo de vegetação nativa de 90m no entorno de canais principais e 30m no entorno de canais secundário, sem nenhum tipo de construção ou perturbação do solo. Os canais degradados poderiam ser recuperados com a introdução de vegetação nativa e bermas, recuperando sua função de drenagem.

Na legislação brasileira critérios de delimitação e o regime de proteção dessas áreas são definidos no Código Florestal<sup>10</sup>. O código define Áreas de Proteção Permanente (APP) como áreas cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade (Inciso II, art. 3º). Essas área e suas faixas de preservação são (art. 4º): (1) faixas marginais de cursos d'água perenes e intermitentes, excluídos os efêmeros, em largura mínima de 30 metros, para os cursos d'água de menos de 10 metros de largura, 50 metros, para os cursos d'água que tenham de 10 a 50 metros de largura, 100 metros, para os cursos d'água que tenham de 50 a 200 metros de largura; 200 metros, para os cursos d'água que tenham de 200 a 600 metros de largura e 500 metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 metros; (2) áreas no entorno dos lagos e lagoas naturais, em faixa com largura mínima de trinta metros, em zonas urbanas; (3)

---

<sup>10</sup> Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012 e alterações.

áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento; (4) áreas no entorno das nascentes e olhos d'água perenes, no raio mínimo de cinquenta metros; (5) encostas com declividade superior a 45°; (6) restingas; (7) manguezais; (8) bordas dos tabuleiros ou chapadas, em faixa mínima de 100 metros; (9) topo de morros, montes, montanhas e serras, com altura mínima de cem metros e inclinação média maior que 25°; (10) áreas em altitude superior a 1.800 metros; (11) em veredas, a faixa marginal, com largura mínima de 50 metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado.

Além das APP supracitadas o Código Floresta ainda define que outras áreas de especial fragilidade ou interesse ambiental possam constituir unidades de conservação (UC). Essas se dividem em: UC de Proteção Integral, onde o objetivo principal é preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais; e UC de Uso Sustentável, onde o objetivo principal é compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais.

Dessas áreas as APP e UC de Proteção Integral, devem ser preservadas e não podem conter ocupações com características urbanas ou rurais. Enquanto as UC de Uso Sustentável, podem conter esse tipo de ocupação, mas que deveriam prioritariamente utilizar parâmetros de urbanização sensível a água.

Ainda, deve-se priorizar a locação áreas mais densificadas em solos menos permeáveis (argilosos), preservando e utilizando solos permeáveis (arenosos e/ou florestados) para infiltração (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000). McHarg, Sutton e Spirm (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973) classificaram os solos de um empreendimento urbano no Texas em quatro diferentes tipos: (A) solo ótimo para recarga; (B) solo bom para recarga; (C) Solo mediano para recarga; e (D) Solos ruins para recarga. E definiram que as áreas urbanas para infiltrar uma chuva de 1", desde que não recebessem escoamento de nenhum outro local, teriam que preservar um mínimo de 10% da área quando implantadas em solos do tipo A, 25% em solos do tipo B e 50% em solos do tipo C, enquanto os solos do tipo D necessariamente teriam que escoar a chuva para outros locais e, portanto, poderiam ser 100% ocupados (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973).

Para os casos onde as áreas recebessem escoamento de outras áreas urbanas para ocupar os solos C ou D, seria necessário para cada unidade ocupada de solo 11% a mais de área preservada de solos do tipo A ou 33% em solos do tipo B ou 100% do tipo C de

modo a garantir a infiltração da água da chuva. Nesse sentido, o estudo recomendava a ocupação em solos do tipo D ou C e preservação, onde possível dos solos do tipo A e B (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973).

### **(ii) Espaços livres de uso público**

Os espaços livres públicos necessários as atividades diárias das cidades, como praças e áreas de recreação deveriam ser planejados para que possam integrar sistemas de gestão da água sustentáveis, oferecendo espaços livres multifuncionais com garantia de desempenho de funções ecossistêmicas.

As técnicas de drenagem sustentável que podem ser implantadas para auxiliar nesse processo podem ser consideradas tanto durante a elaboração do projeto de expansão urbana quanto em projetos de renovação ou requalificação do espaço urbano. E para aumentar as oportunidades para retenção e infiltração da água da chuva, elas podem servir também como espaços de recreação e como espaços para proteção de valores ambientais. Além de, do ponto de vista ecológico, promover o equilíbrio do ciclo natural da água promovendo a recarga de aquíferos, a umidades do solo e mantendo os fluxos de base de corpos hídricos superficiais.

Para isso, ao localizar as áreas de espaços abertos, é necessário considerar não apenas a implantação de vegetação nativa e técnicas de drenagem sustentável, como também seu alinhamento ao longo de linhas de drenagem natural e em solos de maior permeabilidade, de forma a proteger e aproveitar melhorar áreas que contêm recursos naturais relacionados a manutenção do ciclo da água dentro da área urbana (KIAMA MUNICIPAL COUNCIL, 2005; MELBOURNE WATER, 2014)

### **(iii) Lotes**

Na escala do lote, a consideração da topografia, padrões de drenagem existentes, solo, vegetação deveria auxiliar na escolha do local de implantação da construção e de seu layout. Compreender e incorporar as características naturais do terreno no projeto, pode minimizar a perturbação das áreas naturais de alta funcionalidade hidrológica supracitadas.

Para isso, **técnicas de perturbação mínima do solo** e vegetação podem ser utilizadas. Essas técnicas envolvem: reduzir o total de áreas pavimentadas; o tamanho do canteiro de obras, limitando a localização da construção; desconectar as superfícies impermeáveis; manter ao máximo a topografia e canais de escoamento naturais; sem

desrespeitar áreas mínimas exigidas para ruas, elementos estruturais, edificações e manuseio de equipamentos (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973; PRINCE GEORGES COUNTY, 2000).

Ao locar o canteiro de obras, deve-se preocupar com a mínima retirada da cobertura vegetal existente. McHarg, Sutton e Spirn (1973) estimam que a área mínima de perturbação no entorno de construções varia entre 2,5 e 4,5 m. Em adição, a implantação de gramados nas áreas desmatadas e compactadas não é recomendada, uma vez que permite uma menor infiltração da água e menor recuperação da compactação do solo (ANDJELKOVIC, 2001).

Outros exemplos de projeto de ocupação do lote que podem contribuir para esses objetivos incluem (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000; HINMAN, 2012): construções verticais, que ocupam um menor percentual do lote para um mesmo valor de metros quadrados construídos; orientação do maior eixo da edificação ao longo do contorno topográfico para reduzir cortes e aterros do solo; entradas de garagens compartilhadas, para limitar o percentual de pavimentos impermeáveis; limitação da

largura de garagens ao máximo de 2,45m; e redução do afastamento frontal das construções para minimizar o comprimento das áreas de acesso com pavimentos impermeáveis e aumentar a quantidade de áreas não perturbadas no lote (MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973).

A figura 3.6 apresenta, percentuais médios da distribuição de superfícies em lotes com e sem a implementação dessas medidas de perturbação mínima do solo. E a figura 3.7 apresenta exemplos de layout de ocupação de lotes residenciais com aplicação dessas diretrizes.

As áreas impermeáveis remanescentes (telhados e pavimentos) ainda podem ser desconectadas a partir do direcionamento do fluxo de telhados para, zonas vegetadas e solos

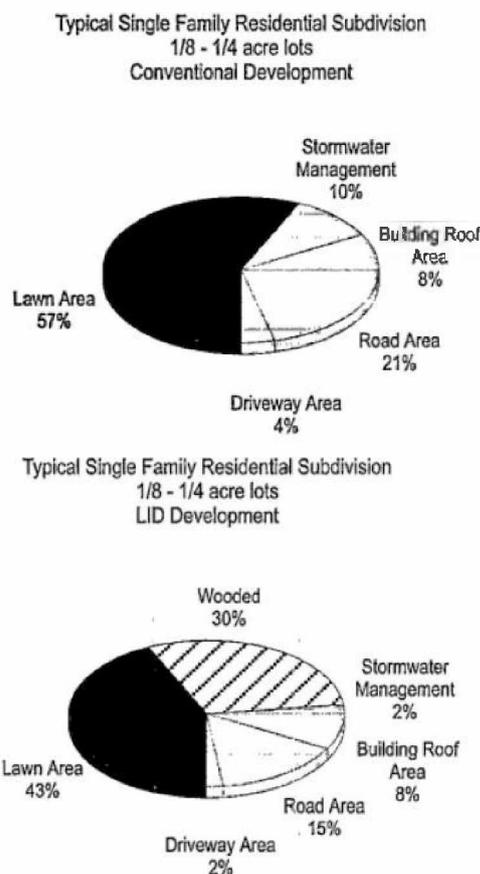
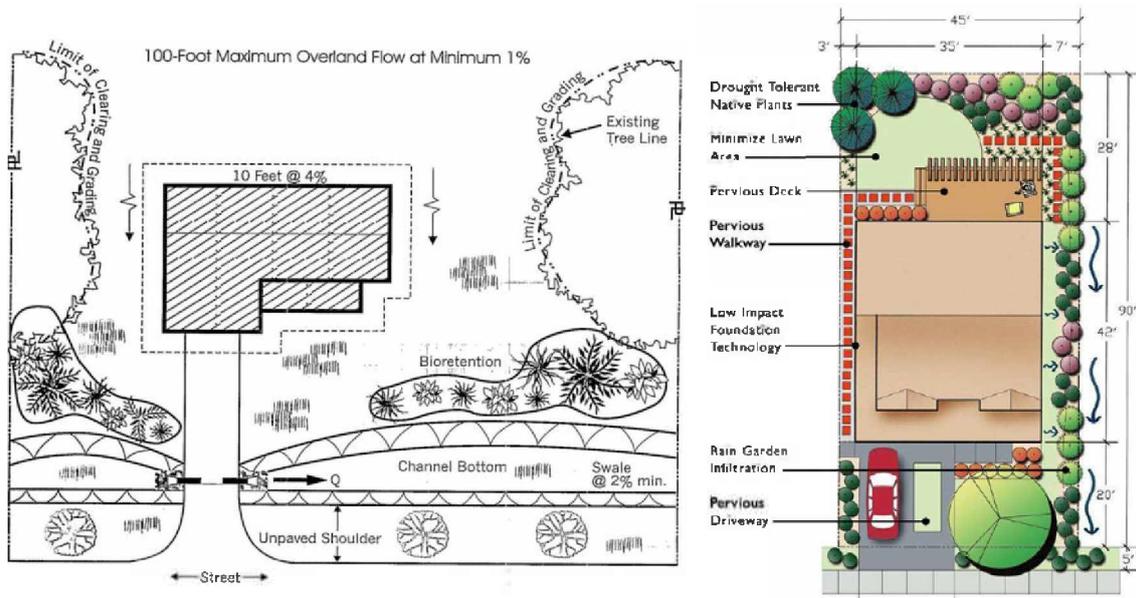


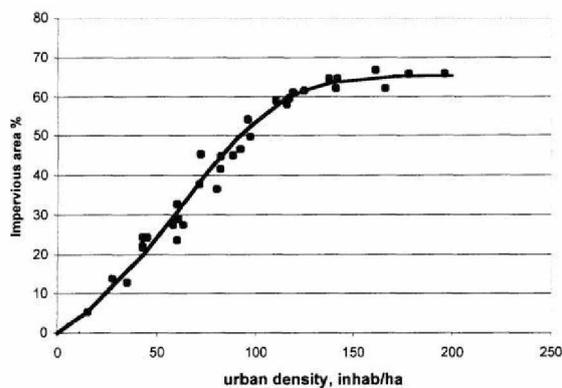
Figura 3.6 - Percentuais médios da distribuição de superfícies em lotes de áreas similares antes e depois da implementação do LID. Fonte: PRINCE GEORGES COUNTY, 2000

de alta permeabilidade de modo que seu escoamento superficial possa ser infiltrado. Para auxiliar nesse processo, as áreas que foram compactadas e ajardinadas durante o processo de construção devem ser trabalhadas para retornar seu nível de permeabilidade pré-construção, com a restauração de vegetação nativa ou técnicas de drenagem sustentável (ANDJELKOVIC, 2001).



**Figura 3.7** – Exemplo de design de um terreno residencial unifamiliar de baixa densidade e alta densidade utilizando as diretrizes supracitadas. Fonte: GEORGES, 2000 e HINMAN, 2012

O conceito chave de aplicação das técnicas de drenagem sustentável, como jardins de chuvas e pavimentos permeáveis, nas abordagens do LID, WSUD e SuDS é o controle de pequena-escala. Ou seja, o emprego de técnicas de drenagem sustentável o mais próximo possível da fonte de geração de excedente de escoamento, como nos próprios lotes. Essa forma de implementação oferece oportunidades significativas para manter as funções hidrológicas de interceptação, infiltração e armazenamento em depressões, respeitando limitações locais de espaço físico, solo, declividade, nível do lençol freático e proximidade à fundações de



**Figura 3.8** - Relação entre áreas impermeáveis e densidade urbana em bairros de São Paulo, Curitiba e Porto Alegre. Fonte: CAMPANA; TUCCI, 1994 apud MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001

edificações (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000).

Devido às recomendações de preservação de espaços naturais, principalmente os de importante função hidrológica e perturbação mínima do solo é comum pensar que o desenho urbano sensível ao ciclo da água só é eficaz em áreas de baixa densidade devido ao aumento das áreas impermeabilizadas e o espaço limitado disponível para implementação de técnicas de drenagem sustentável nessas áreas.

No manual de técnicas não estruturais de drenagem da UNESCO (MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001), por exemplo, é ressaltada a conexão direta entre aumento da densidade urbana e aumento da quantidade de superfícies impermeáveis. Vários estudos (MOTTA; TUCCI, 1984; TUCCI et al., 1989; CAMPANA; TUCCI, 1994 apud MAKSIMOVIC; TUCCI, 2001) demonstram que fatores como o tamanho do lote e seu uso designado, também tem influência sobre o percentual total de áreas impermeáveis, sendo que quanto menor o lote maior a proporção de áreas impermeáveis e lotes de uso comercial ou industrial são associados com maiores proporções de superfícies impermeáveis do que lotes residenciais.

E como visto anteriormente na sessão 1, mesmo 10% de coberturas impermeáveis numa bacia podem prejudicar suas funções hidrológicas, sendo que quando essa porcentagem passa de 25% essa bacia já pode ser considerada bastante prejudicada. Com base nesses dados, para proteger suas fontes de água, muitas prefeituras vêm implantando medidas de zoneamento que estão associadas com a urbanização de baixa densidade, principalmente com limites de impermeabilização no nível dos lotes (FARR, 2013). Entretanto, pesquisas sobre urbanização sensível ao ciclo hidrológico mostram que essa estratégia pode estar equivocada.

Apesar de frações urbanas de baixa densidade possuírem menor área impermeabilizada por lote, elas apresentam maiores áreas com superfícies impermeabilizadas na relação área pública/lote ocupadas com ruas e estacionamentos. Além do que, as superfícies consideradas permeáveis nesse tipo de parcelamento do solo geralmente são compactadas e gramadas proporcionando taxas de infiltração muito baixa, as vezes próximas as de superfícies impermeáveis, já que não é usual a utilização de técnicas de perturbação mínima e drenagem sustentável.

Em adição, análises de drenagem que associam o aumento de densidade com o aumento da impermeabilização do solo levam em consideração apenas a área direta do empreendimento, sem considerar o número de habitações que esse empreendimento comporta ou o impacto sobre a área total da bacia hidrográfica. Assim, essa prática

analítica conclui que as comunidades de baixa densidade urbana minimizam o escoamento superficial na área que elas ocupam. Contudo, pensando no ambiente geral da cidade ou da bacia hidrográfica é preciso analisar onde as demais casas vão estar e que elas também vão ter um impacto sobre a distribuição da água pluvial. Ou seja, analisar como acomodar o crescimento previsto para a região, de forma a minimizar o escoamento total dentro de toda uma região ou bacia hidrográfica, não apenas em terrenos ou áreas específicas.

McHarg, Sutton e Spirm (1973), apontam que a porcentagem mínima do lote que precisa ser perturbada (desmatada e compactada) varia de acordo com o tipo de casa, número de andares e situação da garagem no lote. Em seu estudo de planejamento para Woodlands eles simularam ocupações em uma área de um acre, observando o número de unidades e de sua zona de limpeza (4,5m no entorno da casa) comportadas de acordo com o tipo de unidade (ver tabela 3.5). Por exemplo, um acre de solo perturbado comporta apenas 4.6 unidades unifamiliares isoladas de muito alto padrão e 29.1 unidades de apartamentos de médio padrão, as duas com estacionamento acoplado.

**Tabela 3.5** – Associação entre diferentes padrões de ocupação residencial e áreas perturbadas num parcelamento de um acre. Própria autoria, 2018, com dados de MCHARG; SUTTON; SPIRN, 1973

<b>Tipo de habitação</b>	<b>Área média do lote</b>	<b>Área construída média</b>	<b>Nº médio de andares</b>	<b>% mínima perturbação necessária</b>	<b>Número de unidades/ m<sup>2</sup> perturbado</b>
<b>Unifamiliar isolado de muito alto padrão</b>	4000m <sup>2</sup>	280m <sup>2</sup>	1	22%	4.6
<b>Unifamiliar isolado de alto padrão</b>	950m <sup>2</sup>	240m <sup>2</sup>	2	63%	6.9
<b>Unifamiliar isolado de médio padrão</b>	750m <sup>2</sup>	185m <sup>2</sup>	2	60%	6.6
<b>Unifamiliar isolado de baixo padrão</b>	600m <sup>2</sup>	125m <sup>2</sup>	1	90%	7.9
<b>Unifamiliar com pátio compartilhado de médio padrão</b>	450m <sup>2</sup>	150m <sup>2</sup>	1	78%	11.4
<b>Unifamiliar com pátio compartilhado de baixo padrão</b>	375m <sup>2</sup>	105m <sup>2</sup>	1	94%	11.4
<b>Unifamiliar geminadas de alto padrão</b>	300m <sup>2</sup>	175m <sup>2</sup>	2	82%	16.6
<b>Unifamiliar geminadas de médio padrão</b>	230m <sup>2</sup>	145m <sup>2</sup>	2	81%	19.1
<b>Unifamiliar geminadas de baixo padrão</b>	220m <sup>2</sup>	105m <sup>2</sup>	2	78%	23.3
<b>Apartamentos de médio padrão com área comum compartilhada</b>	4000m <sup>2</sup>	90m <sup>2</sup>	3	58%	29.1
<b>Apartamentos de baixo padrão com área comum compartilhada</b>	4000m <sup>2</sup>	80m <sup>2</sup>	3	60%	34.5

Outro estudo da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2000) modelou cenários de escoamento superficial para três densidades urbanas – 1 unidade por 4.000m<sup>2</sup>; 4 unidades por 4000m<sup>2</sup>; e 8 unidades por 4.000m<sup>2</sup> - em três escalas de ocupação – um acre (4000m<sup>2</sup>); o lote; e a bacia hidrográfica – para examinar a premissa de que a urbanização com densidade mais baixa protege melhor distribuição de água pluvial na bacia. O que foi encontrado é que as densidades mais altas geravam menos escoamento pluvial por moradia em todas as escalas analisadas. Por exemplo, o escoamento gerado por uma casa num terreno de 4000m<sup>2</sup> é metade do escoamento gerado por oito casas nessa mesma área (Ver tabela 3.6).

**Tabela 3.6** – Associação entre diferente densidade de ocupação urbana e geração de áreas impermeáveis e escoamento superficial. Própria autoria, 2018, com dados de EPA, 2000

Cenário	Acres urbanizados	% de coberturas impermeáveis	Escoamento total (ft <sup>3</sup> /yr)	Escoamento por domicílio (ft <sup>3</sup> /yr)	% escoamento por domicílio em relação ao cenário A
<b>Na escala de um acre: Diferentes densidades de ocupação em um acre</b>					
<b>A: 1 domicílio</b>	1	20%	18.700	18.700	0
<b>B: 4 domicílios</b>	1	38%	24.800	6.200	67%
<b>C: 8 domicílios</b>	1	65%	39.600	4.950	74%
<b>Na escala do lote: Oito casas acomodadas nos diferentes cenários de densidade</b>					
<b>A</b>	8	20%	149.600	18.700	0
<b>B</b>	2	38%	49.600	6.200	67%
<b>C</b>	1	65%	39.600	4.950	74%
<b>Bacia Hidrográfica (10.000 acres) – ocupada por 10.000 domicílios</b>					
<b>A</b>	10.000	20%	187M	18.700	0
<b>B</b>	2.500	9,5%	62M	6.200	67%
<b>C</b>	1.250	8,1%	49.5M	4.950	74%

Ainda, outro estudo realizado pela *Maryland Office of State Planning*, que não analisou apenas a área impermeável interna ao lote, como nos dois estudos anteriores, chegou à conclusão que entre lotes residenciais de 0.25 acres e 1.4 acres existe uma redução média de 30% da cobertura impermeável total (internas e externas ao lote) por lote (HINMAN, 2012). Depois desse estudo o município passou a exigir em áreas de muita baixa densidade que um mínimo de 65% da vegetação e solo nativos dos lotes fossem preservados e que não houvesse escoamento excedente de água da chuva nos lotes dessas zonas.

Esses estudos demonstram que a urbanização de maior densidade consome menos solo para abrigar o mesmo número de habitações e que o menor consumo de solo resulta num menor total de área impermeabilizada numa maior escala. Assim a

abordagem do WSUD e LID (EPA, 2000; HINMAN, 2012; WATER, 2014), procuram promover loteamentos de alta densidade, com lotes de habitações menores e mais compactos adjacentes a áreas de espaço aberto públicos que normalmente têm alto valor de amenidade devido a implantação de técnicas de drenagem sustentável. Isso permite maior acesso da comunidade à espaços abertos e à paisagens naturais, como a vegetação remanescente e os cursos de água naturais, que podem ser incorporadas ao espaço aberto. Além disso, a correlação demonstrada em pesquisas entre o aumento da densidade e o aumento das superfícies impermeáveis, pode ser atenuada com as estratégias descritas nessa sessão, podendo variar dependendo do projeto dos lotes e estrutura viária.

Entretanto, algumas ressalvas podem ser feitas, já que embora o aumento das densidades possa proteger melhor a água em um nível regional, no nível do terreno, ela cria maior cobertura impermeável, o que pode aumentar os problemas de qualidade da água em corpos de água adjacentes, o que deve ser levado em consideração.

Ainda, que os problemas locais possam ser amenizados por técnicas de desenho urbano sensível a água que envolvem a implantação de tecnologias de drenagem sustentável, preservar vegetações e solos nativos e incorporar essas práticas em terrenos com alta densidade de ocupação pode ser desafiador. NUNES et al. (2012) procuram demonstrar, por meio de modelagem de parâmetros de ocupação, medidas máximas de ocupação de um lote para a retenção e infiltração de toda a água de uma chuva de longa duração e alta intensidade. Chegou-se num máximo de 60% de cobertura local para construção, e um mínimo de 20% de espaço aberto destinado a infiltração da água no solo (NUNES et al., 2012).

#### **(iv) Estrutura viária**

O traçado viário de vias e ciclovias são de particular importância na estruturação da distribuição do escoamento superficial e sua retenção, uma vez que esses elementos criam grandes áreas de superfícies impermeáveis diretas em um desenvolvimento urbano típico. Por isso é importante para mitigar o impacto dessas estruturas: (1) reduzindo a área total de suas superfícies; (2) diminuído a necessidade de drenagem convencional (bocas de lobo e galerias); (3) aumento da retenção e infiltração com técnicas de drenagem sustentável; e (4) aumento das áreas vegetadas com árvores e solo adequados a infiltração.

A escolha do traçado do traçado viário de uma cidade (ruas, ciclovias, calçadas, estacionamentos, etc.) pode causar variações no total de superfícies impermeáveis diretas em até 30% de uma dada área (ver figura 9) (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000; HINMAN, 2012). O sistema de traçado em grelha uniforme é o que apresenta maiores percentuais impermeabilização e o que mais predomina nas cidades (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000). Eliminar ou reduzir, onde possível, os cruzamentos de vias por meio da ampliação de quarteirões já auxilia na redução do número de vias e por conseguinte da impermeabilização (ver figura 3.9).

Já os traçados curvilíneos geram, de forma geral, menores porcentagens de área impemeável (ver figura 3.9) (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000). A construção desses sistemas tabém pode facilitar o pocionamento das ruas principais alinhadas às curvas de nível do terreno. Fator importante, uma vez que ruas em encostas ingrimes geram perturbação desnecessária do solo na área, já que normalmente exigem muitos cortes e aterros (ANDJELKOVIC, 2001; PRINCE GEORGES COUNTY, 2000).

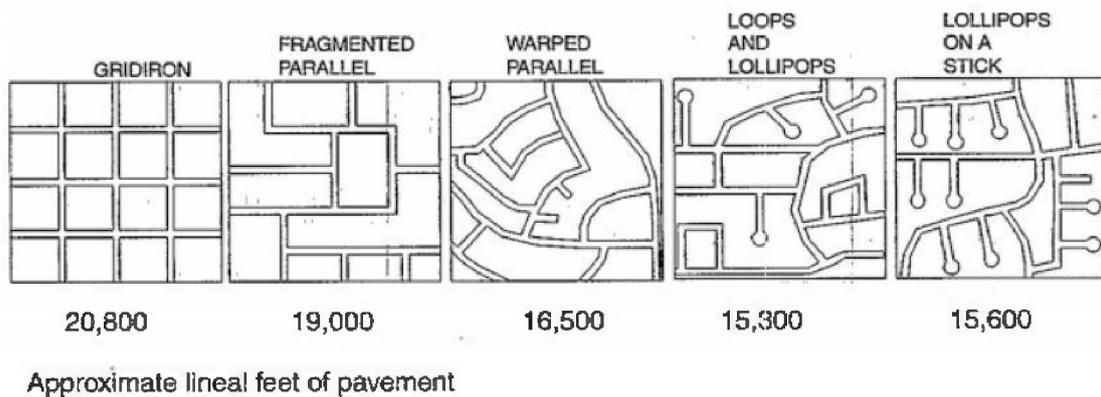


Figura 3.9- Diferentes traçados de vias com suas diferentes áreas de cobertura diferentes num determinado empreendimento. Fonte: PRINCE GEORGES COUNTY, 2000



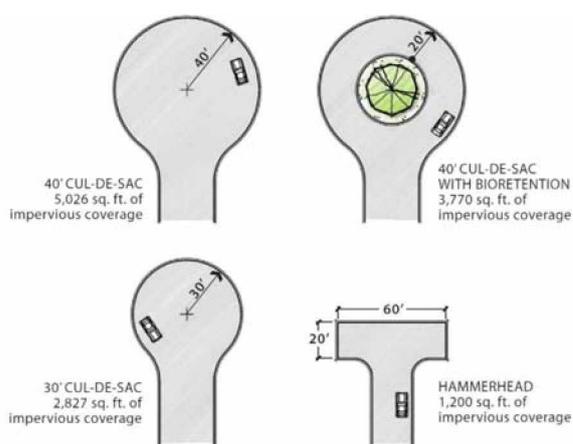
Figura 3.10 - Layout híbrido entre grelha e curvilíneo com a inserção de espaços abertos. Fonte: HINMAN, 2012

Apesar de os padrões espaciais das ruas em grelha, terem uma grande restrição no contexto do LID, ele promove acesso mais direto aos serviços e transporte, enquanto os sistemas curvilíneos geralmente desencorajam as viagens a pé por serem mais longos confusos e menos conectados. Recentemente,

planejadores têm integrado os dois modelos prevalecentes para incorporar o potencial dos dois (ver figura 3.10) (ANDRADE, 2014; HINMAN, 2012). Essas disposição de vias têm recebido vários nomes, incluindo espaço aberto, híbridos e planos de cabeceiras (HINMAN, 2012).

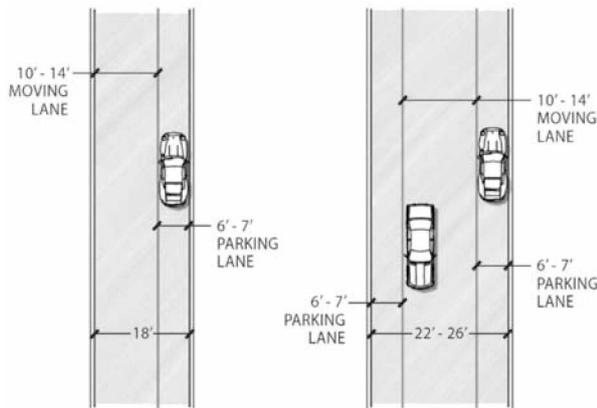
Além do traçado, a largura total das ruas também possui grande influência no total coberto por essas estruturas. A largura pode ser reduzida pela diminuição do número de vagas laterais, pela redução do tamanho de bolsões de retorno e pela redução da largura das faixas (GEORGES, 2000; HINMAN, 2012). Uma redução de largura de 8 para 6m pode reduzir o total de área impermeabilizada de uma rua em 30%, o que resulta em 25% de redução do escoamento gerado nessa área (HINMAN, 2012). O manual de desenvolvimento de baixo impacto para a cidade de Puget Sound, por exemplo, recomenda que ruas de serviço ou de acesso a áreas residenciais não possuam mais de 3,5m de largura quando de mão única e 5m quando de mão dupla (HINMAN, 2012). O impacto da adaptação dessas áreas à essas medidas pode ser enorme, uma vez que a Associação Americana de Estado de Estradas e Transportes estima que 65-80% das ruas do país são de acesso à áreas residências ou rurais (HINMAN, 2012, p. 47).

A configuração dos lotes também influencia na redução das coberturas impermeáveis das estrutura viárias. Casas mais agrupadas e lotes com menores frentes também reduzem o quantitativo total de ruas (HINMAN, 2012). Enquanto, lotes maiores aumentam a quantidade total de área ocupada por ruas para cada residência (HINMAN, 2012).



**Figura 3.11** – Exemplo da redução do total de cobertura impermeável a partir da redução do tamanho de bolsões de retorno e vagas laterais. Fonte: HINMAN, 2012

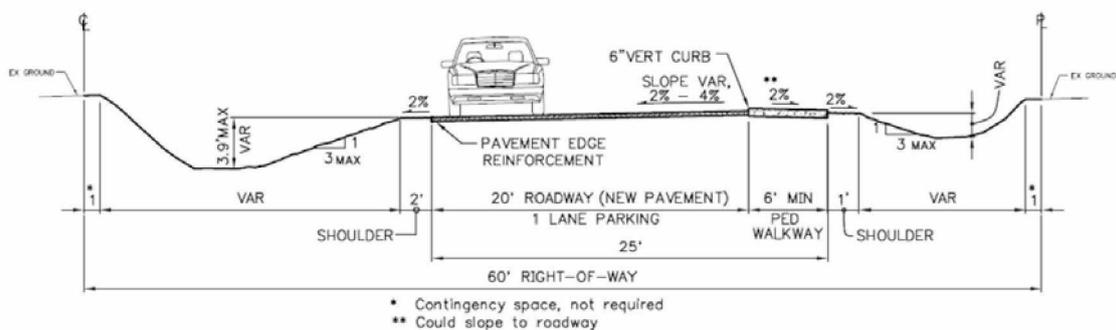
Outra mediada possível redução das das dimensões do sistema viário é a redução de calçadas impermeabilizadas adjacentes as ruas em áreas de baixo movimento, onde os caminhos de pedestre impermeáveis podem ser limitadas a um lado da via, principalmente em locais onde não há acesso a lotes (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000; HINMAN,



2012).

As áreas impermeáveis remanescente ainda podem receber intervenções para se tornarem desconectadas entre si ou aumentarem sua capacidade de retenção e infiltração. Nesse sentido, é possível projetar as ruas de forma que seu escoamento superficial seja drenado para sistemas naturais, zonas vegetadas e solos de alta permeabilidade. Para isso, as características tradicionais das ruas, como os meios-fios, baias e balões devem ser rebaixados abaixo do nível da via para coletar o escoamento dessa. Outras características como os canais laterais de escoamento podem ser substituídas por valas de grama.

As medidas de redução de velocidade, como estrangulamentos, desalinhamentos, refúgios de travessia e balões podem ser rebaixados, com potencial de integrar elementos de drenagem sustentável, como árvores em caixas de plantação de tratamento de águas pluviais ou jardins de chuva. Esse tipo de design encoraja a infiltração e recarga de aquíferos, aproveitando o controle e tratamento do escoamento realizados naturalmente.



**Figura 3.12** - Demonstração de projeto de via com redução da largura e direcionamento do escoamento para áreas com capacidade de infiltração da água em Seattle, EUA. Fonte: HINMAN, 2012

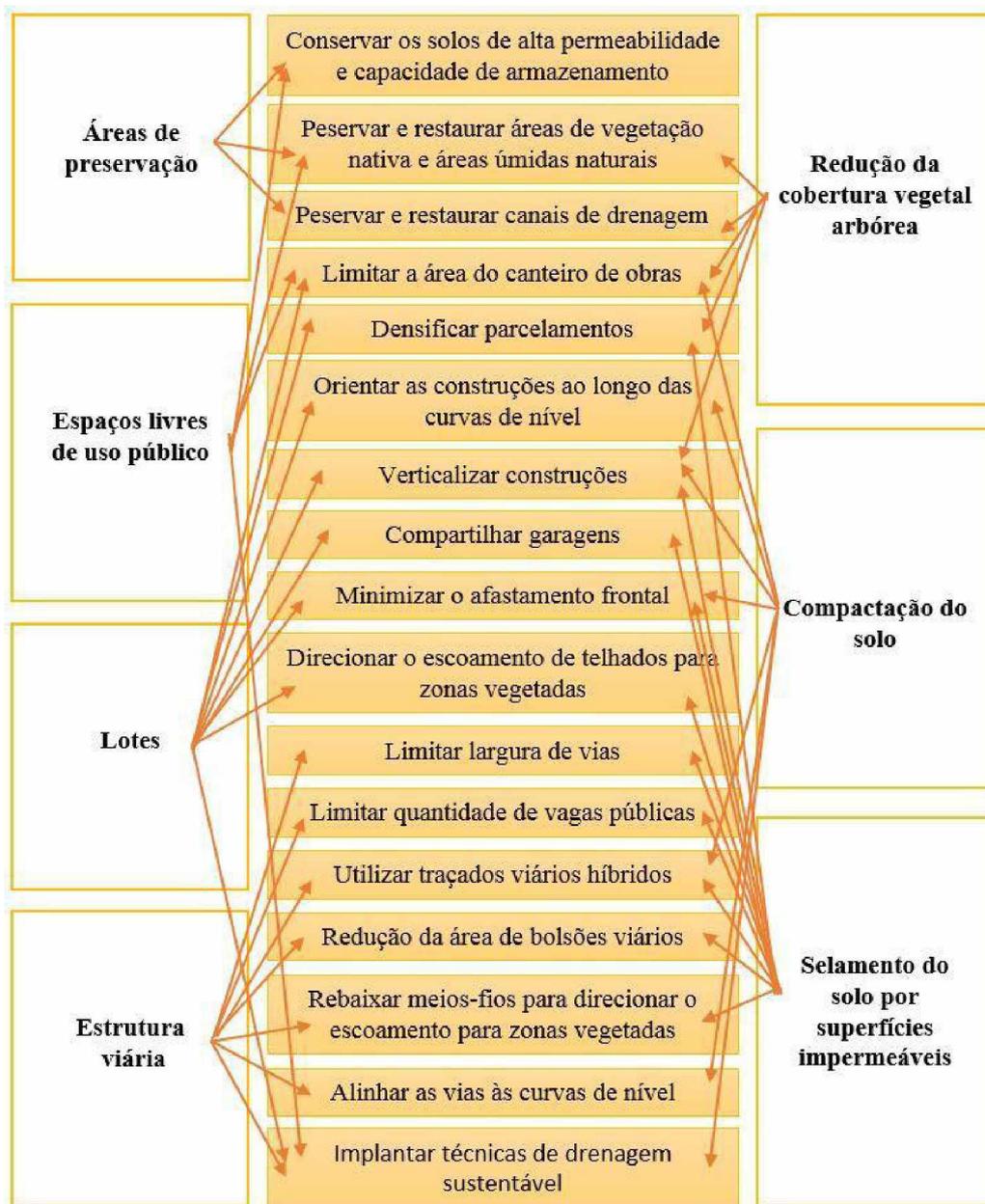


**Figura 3.13** - Rua de acesso residencial em Vancouver que utiliza uma combinação de concreto com pavimentos vazados e grama. fonte: HINMAN, 2012

Outra medida é a utilização de pavimentos permeáveis, que podem servir para aumentar as taxas de infiltração de água pluviais nas áreas destinadas a caminhada, passeios de bicicleta e acesso à áreas residenciais, de serviço e estacionamentos (ruas locais) (PRINCE GEORGES COUNTY, 2000). A infiltração proporcionada por esses pavimentos,

apesar de superior as das superfícies impermeáveis é baixo, já que suas camadas inferiores normalmente são compactadas para sua implantação e pelo uso diário. Alguns exemplos de pavimentos permeáveis são: sistemas de cascalho, concreto permeável, pavimentos vazados e sistemas integrando múltiplos materiais (HINMAN, 2012).

Pode-se reunir todas essas diretrizes de urbanização sensível à água apontadas, em seis estratégias gerais: (1) preservação e recuperação de sistemas naturais com importantes funções hidrológicas; (2) locação de espaços livres de uso público próximos aos sistemas naturais com importantes funções hidrológicas, para que se possa dar multifunções à essas áreas dentro da cidade; (3) ocupação dos lotes com técnicas de perturbação mínima do solo e vegetação; (4) promoção de ocupações de maior densidade; (5) redução e desconexão das áreas impermeáveis, principalmente da estrutura viária; e (6) implantação de técnicas de drenagem sustentável. Essas estratégias permeiam-se entre cada um dos elementos do tecido urbano abordados (áreas de preservação; espaços livres de uso público; lotes; e estrutura viária), servindo muitas vezes a mais de um deles de uma só vez. E também se conectam aos fatores relacionados à perda de infiltração natural da água estudados (seleção do solo, compactação do solo e redução da cobertura vegetal arbórea), podendo mitigá-los (ver figura 3.13).



**Figura 3.14** - Relação entre os elementos do tecido urbano e as estratégias de urbanização sensíveis à infiltração da água da chuva com as condicionantes da perda dessa infiltração na área urbana. Própria autoria, 2018.

### **3.2. Relações entre a forma urbana e a infiltração de água no solo**

Visando encontrar na forma urbana relações entre as diretrizes de urbanização sensível à infiltração da água e as condicionantes relacionadas a perda dessa infiltração nas cidades, faz-se necessário, explorar metodologias de leitura dessa forma. Procurando chegar a um conjunto de elementos configuracionais, que compõem o tecido urbano, e possuem interferência sobre o fenômeno estudado.

A cidade enquanto fenômeno material é entendida pela forma urbana, que corresponde a um conjunto de objetos arquitetônicos ligados entre si por relações espaciais (LAMAS, 2004; ROSSI, 2001). A forma urbana é heterogênea, e essa heterogeneidade deriva das diferentes combinações de elementos naturais e planejados, tais como a distribuição de edificações, pavimentações e vegetação (ANDRADE, 2014).

A forma urbana pode constituir uma resposta, ou mesmo um problema, para um conjunto de questões que o planejamento e projeto urbano pretendem solucionar. Ela é a materialização no espaço da resposta à um contexto, ou seja, é o produto acumulado das características do lugar e de sucessivas decisões de diferentes atores que ao longo do tempo se influenciam mutuamente e continuamente (BETTENCOURT, 2010; LAMAS, 2004).

Para Lamas (2004), a forma urbana apresenta a leitura de um momento da cidade, que não apenas depende da sociedade que a produz e das condições históricas, sociais, políticas e econômicas, mas também de teorias e posições culturais e estéticas de quem a planeja, idealiza e constrói.

O entendimento dessas relações das quais a forma urbana resulta está retomando um papel central nos debates de planejamento urbano devido ao foco no desenvolvimento sustentável, que fortaleceu a importância da compreensão dos impactos das dimensões físicas das cidades (REIS; SILVA; PINHO, 2016). Conjuntamente, o fortalecimento do geoprocessamento e das tecnologias de sensoriamento remoto e o aumento de dados especializados também facilitaram as análises da mesma.

A morfologia urbana é a disciplina que procura estudar a cidade como fenômeno material, buscando compreensão total da forma urbana e do seu processo de formação no tempo, em relação às mudanças sociais, ambientais, econômicas e demográficas e dos atores envolvidos nessa evolução (BETTENCOURT, 2010; GAUTHIEZ, 2003; LAMAS, 2004). Lamas (2004) ressalta ainda que, para a morfologia urbana, esse conjunto de fenômenos supracitados convergem como explicação da produção da forma, mas não como objeto de estudo.

Um estudo morfológico também pode ocupar-se de identificar os níveis de produção da forma urbana e as suas inter-relações. Os mais conhecidos e difundidos ao longo da história do urbanismo se referem à composição urbana e se expressaram em diferentes correntes de desenho ou projeto urbano. Posteriormente, a produção se voltou

a planificação e programação das densidades, proporções, usos e localizações dos elementos e da forma urbana, que vem a se constituir nas correntes de planeamento urbano (LAMAS, 2004).

Ocorre, ainda, que grande percentual das cidades é constituído de modo espontâneo, sem projeto, planeamento ou mesmo tempo hábil em que as correntes acima referidas possam analisar devidamente as relações entre aspectos socioeconômicos e o meio físico, o que acaba por gerar impactos que colocam em destaque os estudos ecológicos sobre a cidade.

Devido ao caráter do fenômeno estudado nessa dissertação, a perda de recarga natural dos aquíferos nas áreas urbanas, a pesquisa não irá se debruçar de forma aprofundada sobre a análise dos níveis de produção da forma urbana (projetos e planeamento). Uma vez que apenas a partir de 1990 medidas que respeitam o comportamento do ciclo hidrológico começaram a ser incorporadas ao planeamento, projeto e gestão urbanos (BROWN; KEATH; WONG, 2009; TUCCI, 2008). Sendo que alguns países em desenvolvimento, como o Brasil, ainda não estão em fases muito iniciais desse processo e ele ainda não se faz perceber em indicações das necessárias mudanças na forma urbana (TUCCI, 2008).

Desse modo, a análise irá se concentrar em identificar na forma urbana os elementos morfológicos que as constituem, relevantes a compreensão do fenômeno estudado na pesquisa. Visa, portanto, a identificação de padrões de ocupação do solo dentro de bacia ou sub-bacias hidrográficas urbanizadas relacionados ao potencial de infiltração natural da água da chuva no solo que possam elucidar a materialização desse fenômeno no momento presente. O que pode revelar possibilidades futuras e contribuir para conduzir decisões de gestão, projeto e planeamento mais informadas.

Os elementos configuracionais são as unidades ou partes físicas que, associadas e estruturadas, constituem a forma urbana (LAMAS, 2004). **Interessa para uma análise da forma urbana estabelecer quais os elementos e arranjos configuracionais que são identificáveis tanto na leitura da cidade já constituída como no processo de sua concepção.** Esses elementos costumam perdurar pelo tempo e pelas formas urbanas, sendo por isso uma importante chave de análise de vários fenômenos.

Lamas (2004) em seus estudos identificou onze elementos configuracionais que compõe as cidades de modo geral: (1) o solo ou pavimento; (2) o edifício; (3) o lote; (4)

o quarteirão; (5) a fachada; (6) o logradouro ou espaço privado do lote não ocupado por construção; (7) a rua ou traçado; (8) a praça; (9) o monumento isolado; (10) a vegetação; (11) e o mobiliário urbano

Panerai (2014) propõe uma organização desses elementos do tecido urbano em três conjuntos: (i) a rede de vias e espaços públicos; (ii) os parcelamentos fundiários; e (iii) as edificações, sendo que:

- (i) A rede de vias e os espaços públicos constituem-se na estrutura básica definidora do espaço das cidades, contribuindo na distinção entre os espaços públicos e privados. Panerai (2014) define os elementos que compõem esse espaço, como as ruas e vielas, bulevares e avenidas, largos e praças, passeios e esplanadas, cais e pontes, rios e canais, e suas margens e praias, que se organizam em rede, a fim de permitir a distribuição e a circulação na cidade.

O traçado viário dá forma ao desenho das quadras e pode ser menos ou mais ortogonal, ter dimensões variadas e respeitar ou impor-se à topografia. Ainda, o traçado pode estar disposto de modo a ressaltar alguma característica física do sítio como a orla marítima ou algum edifício de referência.



Figura 3.15 - Diferentes exemplos de traçada viário. Fonte: SILVA, 2014

O espaço público, como largos, praças e parques, conforma-se em função do espaço negativo das quadras. Sua configuração pode ser mais concentrada ou mais diluída e pode apresentar-se em menor ou maior proporção em reação aos espaços de uso privado. Sua configuração também pode estar relacionada à condicionantes ambientais, como topografia e hidrografia.

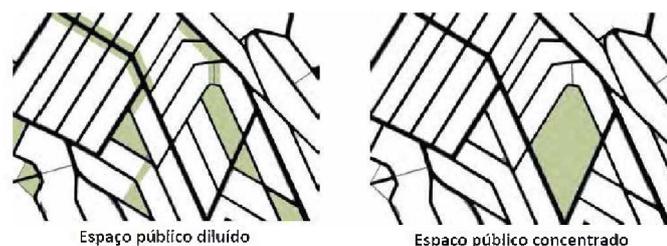
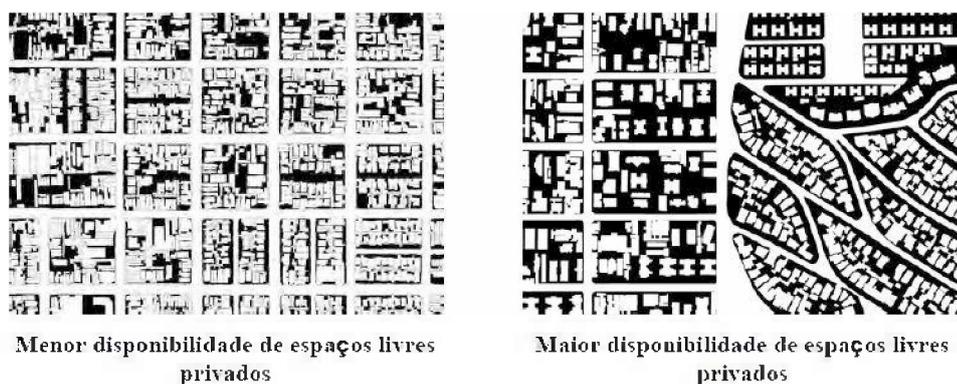


Figura 3.16 - Diferentes exemplos de distribuição dos espaços públicos. Fonte: SILVA, 2014

(ii) Os parcelamentos fundiários são tratados como fator fundamental para a existência do tecido, já que são eles que estruturam a massa edificada. Os parcelamentos são organizados a partir da rua, sendo que as edificações podem estar no alinhamento dela ou recuadas, podem ser geminadas ou isoladas, altas ou baixas, tendo sempre a rua como referência. Os seja, há uma interdependência entre esses dois espaços.

O lote ou estrutura fundiária está relacionada a destinação de usos e pode se constituir por grandes ou pequenas glebas, variando conforme a forma das quadras e espaços públicos. A maneira como o volume edificado ocupa o lote varia de acordo com a intensidade de ocupação e intensidade de aproveitamento vertical. E os logradouros são o espaço negativo resultante dessa ocupação. Juntamente com os espaços públicos esse elemento configura um sistema de espaços livres públicos e privados.



**Figura 3.17** - Exemplo da ocupação dos lotes entre áreas edificadas e espaços livres. Fonte: SILVA, 2014

(iii) As edificações, por fim, correspondem majoritariamente ao espaço privado e vertical. Enquanto, a rede de vias, espaços públicos e parcelamentos, tratam da ocupação do solo, público e privado. Da mesma forma, há uma interdependência entre os edifícios, os parcelamentos e as redes de vias, que juntos geram a forma urbana.

As normatizações urbanísticas procuram regular vários aspectos desses elementos, com foco principalmente nas áreas privadas, ou seja, parcelamentos fundiários e edificações. No nível federal a Lei nº 6.766/79, por exemplo, define percentuais mínimos para o sistema viário, áreas institucionais e áreas verdes, tamanho mínimo e frente de lotes. Já no nível municipal as leis de zoneamento controlam principalmente as áreas privadas dos lotes e edifícios, definindo parâmetros urbanísticos

de uso e ocupação, para definir: (i) o controle de usos, com utilização de categorização de atividades permitidas em zona; (ii) a verticalização e reprodutividade do solo, com utilização de parâmetros como gabaritos e coeficientes de aproveitamento; (iii) a intensidade de ocupação do solo, com mecanismos como taxas de ocupação e de permeabilidade; e (iv) a forma de ocupação, com recuos obrigatórios e dimensões mínimas e máximas e lotes e testadas. Enquanto maiores detalhes sobre parâmetros edilícios são controlados pelo código de obras.

Dentre esses elementos revisados, apenas os relacionados a ocupação do solo são relevantes para a análise do potencial de infiltração da água no solo urbano. Ou seja, os elementos citados relacionados com as redes de vias e espaços públicos e com os parcelamentos fundiários e normalmente regulados pelas leis de zoneamento e parcelamento do solo: (1) o traçado viário; (2) os espaços públicos; (3) e o lote.

Percebe-se a semelhança entre esses elementos e os supracitados espaços do tecido urbano que são foco das diretrizes de urbanização sensível à água: áreas de preservação, espaços livres de uso público, lotes e rede viária. Dessas, as áreas de preservação relacionadas aos sistemas naturais com funções hidrológicas, não seriam efetivamente avaliadas a partir dos elementos configuracionais urbanos discutidos, já que possuem muita pouca intervenção antrópica. A avaliação de seu potencial de permitir a infiltração da água da chuva precisa ser avaliada sob outra ótica e por isso esses espaços não serão avaliados a partir da leitura da forma urbana.

Avançando na discussão, a combinação desses três elementos configuracionais urbanos, identificados como relevantes para compreensão do fenômeno, podem resultar em uma multiplicidade de tipologias que precisam ser identificadas e classificadas. Panerai (2014), denomina tipologia o conjunto de determinados elementos reunidos por uma lógica de variação de características estabelecidas. Esse será um passo essencial no estudo aqui precedido.

Para estabelecer as características dos elementos configuracionais que serão utilizadas como critérios de identificação dessas tipologias, **importa saber sua relação para com o entendimento do fenômeno estudado**. Ou seja, é preciso a identificação de diferentes medidas de avaliação da organização desses elementos que auxiliem a compreensão do fenômeno estudado (OLIVEIRA; MEDEIROS, 2015).

Silva (2014) em seu estudo sugere algumas medidas de organização desses elementos configuracionais, com rebatimento com parâmetros urbanísticos, como: (1) a

taxa de ocupação do lote, ou seja o percentual de área ocupada pela construção em relação a área total do lote; (2) o coeficiente de aproveitamento, que indica a relação entre a área construída e o área do lote, sendo que altos coeficientes indicam uma maior replicabilidade vertical do lote; (3) o alinhamento com o espaço público ou o recuo da construção no lote; (4) o afastamento entre as construções que podem ser geminadas ou livres; (5) tipo de área para automóveis, que podem ser compartilhadas ou não, subterrâneas ou térreas.

Outros exemplos de medidas de avaliação da organização desses elementos podem ser tirados do estudo de Reis, Silva e Pinho (2016), que identificaram 160 diferentes métricas utilizadas em outras pesquisas acadêmicas e as organizam em dez categorias: regularidade da forma, fragmentação, densidade, diversidade, centralidade, acessibilidade, conectividade, inequidade, análises de redes espaciais e outros. Dessas se relacionam com o fenômeno estudado principalmente as seguintes medidas categorizadas como de densidade: (i) proporção de espaços abertos, que relaciona o total de espaços abertos, públicos e privados, comparados com a área total urbana. (2) índice de consumo de terra, que relaciona o consumo médio de terra ocupada por cada unidade residencial. (3) densidade viária, que mede a quantidade de área de vias pela população da área; (4) proporção de áreas impermeáveis; que mede a proporção de superfícies impermeáveis numa da área urbana; (5) tamanho médio do lote; (6) e proporção de áreas ocupadas por vegetação.

Além das referências bibliográficas, nas seções anteriores deste capítulo pode-se observar a importância de aferir três questões em especial: a impermeabilização do solo, sua compactação e a retirada da vegetação arbórea. E ainda, a partir das diretrizes de urbanização sensíveis à água notou-se que das áreas impermeabilizadas é importante: separar as áreas impermeáveis diretamente conectadas a rede de drenagem das indiretamente conectadas; diferenciar as construções, que possuem caráter permanente, dos pavimentos impermeáveis, que podem ser adaptados, reduzidos e desconectados; e separar a estrutura viária, das demais superfícies devido sua preponderância e estratégias específicas de intervenção. Essas características se aplicam a todos os elementos configuracionais identificados.

Também, percebeu-se que há uma associação clara entre as áreas compactadas e as áreas desmatadas, já que normalmente após o desmatamento compacta-se o solo na fase de construção a partir da passagem de maquinário pesado e movimentação de terra.

A partir disso, conclui-se que para entender a relação entre a forma urbana e o potencial de infiltração da água importa saber para todos os elementos configuracionais selecionados o tipo e quantidade de cobertura vegetal existente (principalmente em relação ao porte e natividade).

Além desses fatores é importa saber também, individualmente sobre os lotes: (i) a replicabilidade vertical das construções; (ii) a orientação das edificações ao longo do contorno topográfico; (iii) o tipo de garagem; (iv) afastamentos; (v) tamanhos dos lotes; (vi) densidade da ocupação; e (vii) implantação de técnicas de drenagem sustentável.

Para o traçado viário, importa saber especificamente: (i) o tipo do traçado; (ii) a quantidade de estacionamentos públicos; (iii) largura de vias de acesso e serviço; e (iv) implantação de técnicas de drenagem sustentável. E para as áreas de espaços públicos importa especificamente: (i) sua associação com áreas ambientais de alto valor hidrológico; e (ii) a implantação de técnicas de drenagem sustentável.

Esses critérios de avaliação dos elementos configuracionais indicados estão diretamente relacionados com parâmetros urbanísticos, que podem ser utilizados tanto para uma avaliação quantitativa de tipologias identificadas, quanto para o planejamento e projeto dessas áreas. A tabela 3.7 apresenta os critérios de avaliação identificados, quanto ao seu potencial de infiltração da água da chuva, para os elementos configuracionais urbanos traçados viário, espaços públicos e lotes; e seus respectivos parâmetros urbanísticos.

**Tabela 3.7** – Medidas de avaliação dos elementos configuracionais da forma urbana relevantes ao potencial de infiltração natural das águas da chuva. Própria autoria, 2018.

<b>Elementos configuracionais</b>	<b>Crítérios de avaliação</b>	<b>Parâmetros urbanísticos</b>
<b>Sistema viário</b>	(i) Área ocupada; (ii) Área diretamente conectada à rede de drenagem (iii) Tipos de traçado; (iv) Quantidade de estacionamentos; (v) Largura de vias de acesso e serviço (vi) Implantação de técnicas de drenagem sustentável	(i) % de área ocupada total (ii) % de área ocupada por estacionamentos (iii) Largura min. e máx. de vias de acesso e serviço (iv) Área ocupada por domicílio ou habitante
<b>Áreas Públicas livres</b>	(i) Disponibilidade de espaços livres públicos (ii) Associação dos espaços públicos a áreas ambientais de alto valor hidrológico (iii) Percentual de áreas impermeáveis	(i) % de área ocupada total (ii) % de área impermeabilizada (iii) % de área arborizada

	(iv) Presença de vegetação arbórea (v) Implantação de técnicas de drenagem sustentável	
<b>Lotes</b>	(i) Tamanho médio dos terrenos (ii) Densidade de ocupação (iii) Orientação das construções ao longo do contorno topográfico (iv) Disponibilidade de espaços livres privados (v) Presença de vegetação arbórea (vi) Tipos de afastamento (vii) Tipos de garagem (viii) Implantação de técnicas de drenagem sustentável	(i) Tamanho min. e máx. dos lotes (ii) Taxa de ocupação (iii) % de área impermeabilizada (iv) Afastamentos min. e máx. (v) Área impermeabilizada por domicílio (vi) % de área arborizada

## Síntese do capítulo

Como visto, as avaliações dos impactos hidrológicas urbanos, voltados em sua maioria para o cálculo do escoamento superficial, levam em consideração principalmente as alterações relacionadas ao percentual de superfícies impermeáveis ou densidade construtiva. Entretanto, dada a relevância dessas superfícies na perda da infiltração, importa saber outras nuances da relação forma urbana - impacto hidrológico, que possam informar as áreas do planejamento e projeto urbano.

A infiltração natural é significativamente reduzida nas áreas urbanas devido principalmente a fatores que afetam a taxa máxima possível de entrada da água no solo e a permeabilidade de suas primeiras camadas, o que reduz a recarga natural dos aquíferos. Sendo que, além das superfícies impermeáveis, outras duas condições de manipulação do solo urbano também afetam esses fatores e levam a significativas perdas de infiltração natural: a compactação do solo e a redução da cobertura vegetal arbórea.

Apesar de essas condições serem menos aplicadas às análises das alterações hidrológicas urbanas, com as atuais técnicas de manejo do solo, onde grande parte das áreas dos canteiros de obra é desmatada, aplainada e posteriormente gramada, a compactação do solo e presença de áreas gramadas ou com solo exposto, se estende pela maior parte das cidades; o que pode reduzir significativamente as taxas de infiltração e precisa ser considerado.

Nesse contexto, é salientado o papel do desenho urbano no melhor ou pior desempenho hidrológico geral urbano, onde características das áreas de preservação, espaços livres de uso público; lotes; e rede viária possuem uma grande influência sobre esse desempenho e podem ser trabalhadas para mitigar a perda infiltração natural de água da chuva nas cidades.

Nesse seguimento, procurou-se diretrizes de mitigação de perda de infiltração para essas áreas a partir do estudo de manuais das abordagens do IHP, LID, WSUD e SuDs. Para as áreas de preservação viu-se que importa conservar as áreas relacionadas com as principais funções hidrológicas do território, que incluem: (1) áreas florestadas, tanto as de grande porte, quanto as de pequeno porte presentes dentro de estruturas urbanas consolidadas; (2) corpos d'água e suas zonas de amortecimento; (3) zonas úmidas naturais; (4) solos de alta permeabilidade e capacidade de armazenamento; e (5) canais naturais de drenagem. Em relação aos espaços públicos é recomendado que esses sejam multifuncionais e garantam, além de espaços para recreação, o desempenho de importante funções ecossistêmicas hidrológicas. E para isso é importante localizá-los ao longo de linhas de drenagem natural, em solos de maior permeabilidade, com a utilização de vegetação nativa e técnicas de drenagem sustentável.

Para os lotes, indica-se a utilização de técnicas de perturbação mínima do solo, onde é estabelecido limites de perturbação, reduzido e desconectado o total de áreas pavimentadas, limitada a projeção da construção no terreno e mantido ao máximo a topografia e canais de escoamento naturais. Essas recomendações de perturbação mínima dos lotes, que promovem maiores espaços abertos, levam em geral a um pensamento comum de que o desenho urbano sensível ao ciclo da água é mais eficaz em áreas de baixa densidade. Entretanto essa relação entre densidade e impacto hidrológico não é, nem tão direta, nem tão verdadeira. Como visto, os lotes de alta densidade, quando colocados no contexto regional, trazem mais benefícios para as bacias urbanas do que os de baixa densidade, gerando um total menor de superfícies impermeáveis, de escoamento superficial e principalmente de áreas impermeáveis e perturbadas por habitante.

E ainda, para mitigar os impactos do sistema viário é importante: (i) a redução da área total de suas superfícies; (ii) a redução da necessidade de drenagem convencional; (iii) o aumento da retenção e infiltração com técnicas de drenagem

sustentável; e (iv) aumento das áreas vegetadas com árvores e solo adequados a infiltração.

Por fim, a revisão do tema da morfologia urbana permitiu constituir um arcabouço teórico/metodológico e linha de raciocínio para compreender a relação entre essas diretrizes e os padrões morfológicos de ocupação do solo urbano.

O maior conhecimento da superfície urbana e da relação forma-impacto hidrológico é elemento essencial para o planejamento e projeto urbanístico de menor efeito sobre a perda de recarga natural dos aquíferos. Nesse sentido, há muito a conhecer sobre a dinâmica de vários parâmetros urbanísticos identificados como importantes para este fenômeno, entre eles o percentual de áreas impermeabilizadas diretamente conectadas aos sistemas convencionais de drenagem, o percentual de áreas arborizadas, a taxa de ocupação, a densidade e a área de perturbação do solo do solo.

## **CAPÍTULO 04**

### **Relações entre as áreas propícias à recarga dos aquíferos e à urbanização no Distrito Federal**

Com base principalmente nos conceitos estabelecidos no capítulo 02 desta pesquisa, o presente analisa as relações entre o processo de recarga dos aquíferos e o processo de urbanização no Distrito Federal, destacando a ocorrência de ocupações urbanas em áreas propícias à recarga no território.

Para isso o capítulo se divide em três partes que: (1) apresenta uma caracterização dos aquíferos do Distrito Federal e da importância dos serviços ecossistêmicos desempenhados pelos mesmos; (2) caracteriza os fatores meio físico do Distrito Federal intervenientes no processo de recarga e favoráveis a urbanização, procedendo suas espacializações; e (3) analisa o histórico de ocupação urbana do território e as interfaces entre as áreas propícias à urbanização e recarga identificadas.

#### **4.1. Caracterização dos aquíferos do Distrito Federal**

No capítulo 02 desta pesquisa foram apresentados definições e conceitos relacionados com a distribuição da água no subsolo e com os principais serviços ecossistêmicos desempenhados pelos mesmos, conforme elencado: (1) provimento de água; (2) regulação do escoamento superficial; (3) regulação das vazões de água superficial; e (4) regulação da qualidade da água.

No Distrito Federal, a falta de conformações naturais de retenção de águas superficiais e pelo clima composto de um período chuvoso e um período seco fazem com que as águas subterrâneas tenham grande função estratégica especialmente para: (i) manutenção das vazões superficiais das drenagens superficiais na época de seca; (ii) como reservatório natural de estocagem estratégica de água; e (iii) no abastecimento de núcleos rurais, urbanos e condomínios, em especial, na época de seca.

Durante o período da seca, toda a descarga que mantém a perenidade dos cursos d'água e alimentação dos pequenos mananciais provém dos aquíferos freáticos. Ainda, devido a geomorfologia local, é necessária especial atenção à manutenção das funções armazenadoras dos aquíferos, já que as águas superficiais tendem a escoar para fora do

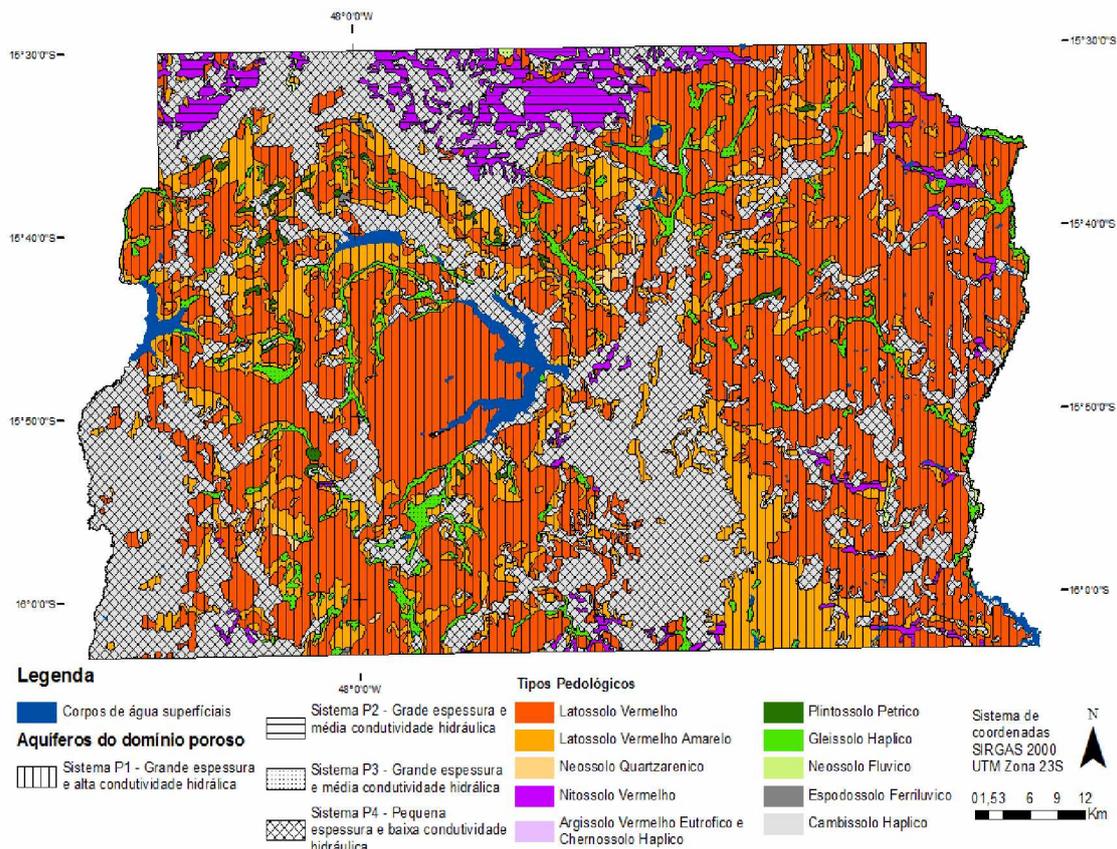
território, possuindo alta relevância para a sustentação da quantidade de água e para manutenção da cidade e suas funções (CAMPOS, 2004).

Os aquíferos do Distrito Federal podem ser caracterizados em dois grandes grupos de acordo com sua estrutura porosa e de acordo com o meio onde ocorrem: (1) os aquíferos rasos ou freáticos ocorrem nos solos e no manto de alteração das rochas (saprólito) e possuem porosidade intergranular; e (2) os aquíferos profundos, compostos por as unidades litológicas (rochas) dos quais fazem parte o domínio dos aquíferos de porosidade fraturada e o domínio dos aquíferos de porosidade fissuro-cársticas.

A caracterização dos aquíferos rasos está vinculada a parâmetros hidrológicos dos solos e do saprolito, dos quais dois são destacados: a espessura saturada e a condutividade hidráulica K (permeabilidade); e em função dos quais, os aquíferos intergranulares são divididos em quatro sistemas: P1, P2, P3 e P4. Os sistemas P1 e P2 são caracterizados por espessuras em média maiores que 20 metros e condutividades hidráulicas, respectivamente, alta e moderada. Enquanto, no sistema P3 as espessuras totais são reduzidas para menos de 10 metros e a condutividade hidráulica assume valores menores que  $10^{-6}$  m/s. E o sistema P4 caracteriza-se por pequenas espessuras (comumente menores que 1 metro, podendo alcançar 2,5 metros) e condutividade hidráulica muito baixa, sendo comum a ausência de zona de saturação. Assim, os aquíferos rasos de maior capacidade de armazenamento e vazão se encontram respectivamente nos sistemas P1 e P2. Enquanto o sistema P3 apresenta níveis baixos de capacidade de armazenamento e o sistema P4 apresenta muita baixa permeabilidade e vazão. A tabela 4.1 apresenta resumidamente as características desses sistemas e o mapa 4.1 a distribuição desses sistemas no território.

**Tabela 4.1**– Características hidrológicas dos sistemas de aquíferos intergranulares ou rasos do Distrito Federal. Própria autoria, 2017, com dados de GDF, 2018 e Resolução ADASA nº 01, 28/02/2011

Domínio	Sistema	Espessura saturada (m)	Vazão Média (m <sup>3</sup> /h)	Condutividade Hidráulica (m/s)	Reserva Total Explotável (m <sup>3</sup> /ano)
<b>Intergranular ou poroso</b>	Sistema P1	>5m	<0,8	Alta: $2,8 \times 10^{-4}$ a $1,7 \times 10^{-5}$	1.241.930.365,00
	Sistema P2	>10m	<0,5	Moderada: $10^{-5}$ a $10^{-6}$	72.627.774,00
	Sistema P3	<15m		Baixa: $2,3 \times 10^{-6}$ a $1,4 \times 10^{-7}$	5.874.892,50
	Sistema P4	<3m	<0,3	Muito Baixa	146.164.284,75



**Figura 4.1** – Mapa dos Sistemas de aquíferos intergranulares ou rasos do Distrito Federal e das pedologias predominantes associadas a cada sistema. Própria autoria, 2018, com dados de GDF, 2017

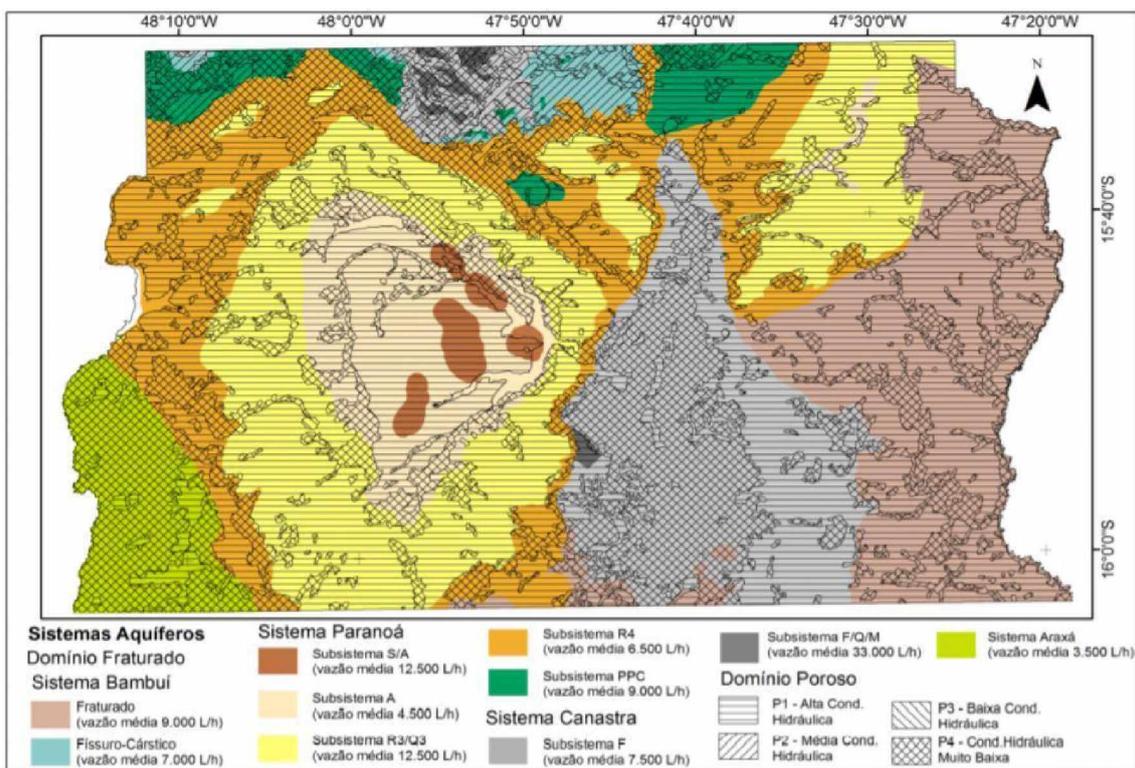
A caracterização dos aquíferos profundos, devido a existência de uma grande variação de tipos litológicos, requer uma divisão também em subsistemas. A geologia do Distrito Federal é composta, considerando a ordem deposicional da base para o topo, pelos grupos litológicos: Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí, respectivamente contribuindo com cerca de 15,65; 5 e 15% de sua área total.

Dentro dessa divisão litológica, os aquíferos do domínio fraturado são caracterizados por planos de fraturas que ocorrem em profundidades que variam de alguns metros a centenas de metros, possuem formação livre ou confinada, extensão lateral variável e são fortemente heterogêneos. Com raras exceções, esse domínio está limitado a profundidades pouco superior a 250 metros. O principal fator que controla a condutividade hidráulica desses aquíferos é a densidade das discontinuidades do corpo rochoso, variando significativamente até em um mesmo grupo litológico. A existência de poços secos nesse domínio é relacionada à maior presença de material argiloso (metassiltitos e ardósias).

Na região do Distrito Federal os aquíferos fraturados ocorrem vinculados a todos os sistemas litológicos e são separados em subsistemas segundo suas semelhanças hidrodinâmicas. No sistema Paranoá, esses aquíferos estão vinculados aos subsistemas S/A, A, R3/Q3 e R4. No sistema Canastra, estão associados ao Subsistema F. E ainda ocorrem em todos os sistemas Araxá e Bambuí. Os subsistemas S/A e R3/Q3 apresentam vazões média de 12 m<sup>3</sup>/h e 12,2 m<sup>3</sup>/h respectivamente e média condutividade hidráulica, possuindo grande importância hidrogeológica local. Os aquíferos do subsistema R4 e F possuem vazões média de 6,14 m<sup>3</sup>/h e 7,5 m<sup>3</sup>/h respectivamente e baixa condutividade hidráulica, configurando importância local hidrogeológica moderada. O sistema Bambuí apresenta vazões médias de 5,21 m<sup>3</sup>/h, condutividade hidráulica média a baixa e importância hidrogeológica local mediana. Já o subsistema A e o sistema Araxá possuem vazões médias de 4,39 m<sup>3</sup>/h e 3,14 m<sup>3</sup>/h respectivamente e muito baixa condutividade hidráulica, o que torna pequena sua importância hidrogeológica local (SOUZA, 2013).

Os aquíferos do domínio fissuro-cárstico são representados por situações onde as rochas carbonáticas acontecem na forma de lentes finas com restrita continuidade lateral entre litologias pouco permeáveis (siltitos argilosos, folhelhos ou filitos). Nesses casos a dissolução cárstica fica limitada a cavidades restritas, inferiores a 3 metros de abertura. Entretanto, mesmo não representando sistemas cársticos clássicos, essas ocorrências são responsáveis pelas vazões mais expressivas em poços individuais na região do Distrito Federal.

Os aquíferos fissuro-cársticos ocorrem vinculados ao Sistema Paranoá, onde estão associados ao subsistema PPC e ao Sistema Canastra, associados ao Subsistema F/Q/M. O subsistema F/Q/M apresenta especial importância na região do Distrito Federal, pois é responsável pelo abastecimento exclusivo da Cidade Satélite de São Sebastião e apresenta a maior vazão média de todos os sistemas de aquíferos, com média de vazões de 33 m<sup>3</sup>/h. Enquanto o Subsistema PPC apresenta média de vazões de 9,1 m<sup>3</sup>/h, com alta variabilidade lateral, de condutividade hidráulica e importância hidrogeológica local variável (SOUZA, 2013).



**Figura 4.2** – Mapa dos Sistemas de aquíferos rasos e profundos do Distrito Federal. Fonte: Gonçalves, 2007.

**Tabela 4.2** - Características hidrológicas dos sistemas de aquíferos profundos do Distrito Federal. Própria autoria, 2018, com dados de GDF, 2017 e Resolução ADASA nº 01, 28/02/2011

Domínio	Sistema	Subsistema	Vazão Média (m <sup>3</sup> /h)	Condutividade Hidráulica (m/s)	Reserva Total Explotável (m <sup>3</sup> /ano)
Fraturado	Paranoá	S/A	12,5	Moderada: $2,5 \times 10^{-6}$ a $1,7 \times 10^{-7}$	16.344.738
		A	4,5	Baixa	54.961.064
		R3/Q3	12,0	Elevada a moderada: $1,7 \times 10^{-5}$ a $5,3 \times 10^{-7}$	851.307.116
		R4	6,5	Baixa	197.302.845
	Canastra	F	7,5	Moderada a média	87.180.942
	Bambuú	-	6,0	Média a baixa	218.469.173
	Araxá	-	3,5	Muito baixa	43.555.208
Físsuro-Cárstico	Paranoá	PPC	9,0	Elevada a baixa	192.154.458
	Canastra	F/Q/M	33,0	Muito elevada	26.201.886

Atualmente, o uso da água subterrânea para abastecimento doméstico urbano ocorre principalmente em áreas de expansão urbana, na forma de condomínios irregulares, nas cidades de Sobradinho, Planaltina, São Sebastião e Jardim Botânico. Os poços controlados pela CAESB que abastecem essas áreas (São Sebastião, Jardim Botânico, Incra-8, Sobradinho, Arapoanga, Itapoã, Papuda e Água Quente), possuem

capacidade de produção estimada de 2.500 m<sup>3</sup>/h, representando cerca de 6% da capacidade total do sistema produtor da Companhia, em 2007. Das cidades abastecidas destaca-se São Sebastião, onde o abastecimento é feito exclusivamente pela exploração de 20 poços tubulares profundos, num sistema com vazões de até 186 m<sup>3</sup>/h. Ainda, na zona rural do DF a CAESB abastece 47 comunidades rurais com população de aproximadamente 17.000 habitantes por meio da exploração de 46 poços tubulares profundos, com uma capacidade total de produção de 470 m<sup>3</sup>/h.

Além das áreas abastecidas pela CAESB, na zona rural do Distrito Federal inúmeras chácaras e residências utilizam água subterrânea para abastecimento doméstico, normalmente exploradas de aquíferos rasos, do Domínio Intergranular. Ainda nessa finalidade pode-se citar o uso da água subterrânea por residências dos lagos norte e sul, e do setor de mansões Park Way, que apresentam uma grande demanda de água para irrigação de jardins e manutenção de piscinas

No setor de serviços, o uso de água subterrâneas por meio de poços é comum em função desse procedimento ser mais barato do que utilizar a água distribuída pela CAESB em casos onde não se exige água tratada, como lavagem de veículos, manutenção de piscinas e lavagem de quadras e salões. Sendo que os setores que se destacam nesse uso são os postos de combustíveis, lava-jatos, empresas de transporte público, clubes e escolas. O setor industrial também encontra na água subterrânea um recurso barato para economizar no processo produtivo. Os ramos industriais do Distrito Federal que mais consomem água subterrânea são o de bebidas, de alimentos e de cimento. Também, na agropecuária, o cultivo de hortifrúti costuma utilizar água subterrânea para irrigação por meio de poços tubulares pouco profundos, assim como as atividades de criação de animais e abatedouros.

Apesar de sua importância, a redução da quantidade de água subterrânea no Distrito Federal devido à perda da função de recarga e a sobrexploração já pode ser observada. Segundo Campos (2004), nos condomínios da região de Sobradinho essa situação já pode ser observada desde 2000, a exemplo do Condomínio Alto Bela Vista, onde um poço com vazão de 10.000 l/h em 1992 passou a uma vazão de cerca de 3.500 l/h no ano 2000.

A crise hídrica pela qual o DF vem passando desde o final de 2016, também não acometeu apenas os reservatórios superficiais de água e as áreas abastecidas pelos mesmos. Afetou também áreas abastecidas pelas águas subterrâneas, onde devido

diminuição de vazão e falhas na captação a CAESB teve que fazer redução de pressão e rodízio de abastecimento em Brazlândia, Sobradinho e Sobradinho II, Planaltina, Fercal e São Sebastião<sup>11</sup>.

Diferentemente dos reservatórios superficiais, a redução de água nos aquíferos não pode ter sido causada por mudanças recentes no regime de chuvas, uma vez que o tempo de deslocamento da água nesses reservatórios é mais lento. Os resultados de uma pesquisa de Lousada e Campos (2006) mostram que mesmo as águas presentes nas porções mais rasas dos aquíferos freáticos apresentam idades, em média, mais velhas que cinco anos, ou seja, representam misturas de águas recentes com águas que ocuparam o aquífero nos últimos anos. Enquanto as águas mais profundas apresentam idades mais antigas que 30 anos. Ou seja, os impactos percebidos, principalmente nos poços profundos, demonstram que há outros fatores envolvidos na situação de escassez hídrica no Distrito Federal, que não apenas as mudanças no regime de chuvas recentes.

Esse contexto, mostra que os serviços ecossistêmicos, oferecidos pelos aquíferos do Distrito Federal, de provimento de água e regulação das vazões de corpos d'água superficiais sofreram reduções relacionadas ao uso e ocupação do território, o que demonstra a importância de uma gestão do ciclo da água mais integrada a política de planejamento territorial. Sendo que no caso urbano, essa gestão envolve padrões urbanísticos de ocupação mais sensíveis às áreas de recarga dos aquíferos, preservação de sistemas naturais que desempenham importantes funções hidrológicas e diminuição da demanda.

## **4.2. Fatores do meio físico intervenientes no processo de recarga e ocupação urbana do Distrito Federal**

No capítulo dois desta pesquisa foi exposto que o processo de recarga dos aquíferos depende principalmente das seguintes características do meio físico: (1) maiores altitudes relativas; (2) menores declividades; (3) maior altura de chuvas de baixa intensidade; (4) solos espessos com alta condutividade hidráulica; e (5) umidade do solo anterior a precipitação correspondente a capacidade de campo.

Enquanto as áreas favoráveis a ocupação urbana requer características do meio físico associadas a: (1) climas amenos (radiação solar, temperatura, velocidade dos

---

<sup>11</sup> Resolução nº 21 da Agência Reguladora de águas, energia e saneamento básico do Distrito Federal - ADASA, de 08 de setembro de 2018

ventos e umidade); (2) disponibilidade hídrica, que está relacionada com a grande altura de precipitações e formações geológicas que permitam seu armazenamento; (3) menores declividades; (4) solos coesos, com alta resistência a cargas, profundo, homogêneos e compactados.

Essas características do meio físico supracitadas podem ser analisadas principalmente por meio do estudo da geomorfologia, pedologia e clima, como veremos a seguir:

#### **(i) Geomorfologia:**

O Distrito Federal está localizado no Planalto Central Brasileiro, onde se localizam as cabeceiras dos três maiores rios brasileiros: Maranhão, afluente do Rio Tocantins; o Rio Preto, afluente do Rio São Francisco; os rios São Bartolomeu e Descoberto, tributários do Rio Paraná. A área do DF é constituída por planaltos, planícies e várzeas, sendo que sua altitude varia de 600 a 1.300m.

Novaes Pinto em 1994 (apud Lousada & Campos, 2005; Souza, 2013) propôs dividir o DF em três compartimentos geomorfológicos, quais sejam: (a) Região de Chapadas (34%), com cota altimétrica acima de 1000m e relevo plano a suave ondulado; (b) Áreas de Dissecação Intermediária (31%), com relevo fracamente dissecado; e (c) Região Dissecada de Vale (35%), associadas a depressões ocupadas pelos rios da região. Tal compartimentação se baseou nas características topográficas, altimétricas e de cobertura dos solos.

Também, em 1998 Martins & Baptista (apud Lousada & Campos, 2005; Souza, 2013) propuseram uma compartimentação geomorfológica para o Distrito Federal tomando por base, além das feições de relevo descritas acima, as relações entre os processos morfogenéticos atuantes na paisagem: pedogênese, erosão e deposição. Assim, definiram cinco compartimentos: (a) Planaltos; (b) Planos Intermediários; (c) Rebordos (declividades <20%) para discriminar zonas de transição entre compartimentos; (d) escarpas (declividade média de 45%), caracterizadas pela quebra abrupta de relevo; (e) Planícies.

Em 2011, o relatório do meio físico e biótico elaborado pelo ZEE/DF (GDF; GREENTEC, 2011), assumiu as abordagens de Novaes Pinto (1994) e Martins & Baptista (1998) e integrou e adaptou essas duas propostas definindo cinco novos compartimentos, a saber: Planos Elevados, Planos Intermediários, Vales Dissecados, Rebordos e Rampas Íngremes (ver figura 4.3). Para a construção desta proposta os

critérios de maior relevância considerados foram o padrão de relevo, a declividade, o grau de dissecação e a densidade de drenagem. Sendo as principais características de cada compartimento são:

- i. Planos Elevados: apresentam relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, predominância de Latossolos, declividades inferiores a 10% e cotas altimétricas superiores aos 1100 metros.
- ii. Planos Intermediários: corresponde às áreas com padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades inferiores a 12% e cotas altimétricas entre 950 e 1050 metros.
- iii. Vales dissecados: compreende as áreas com relevo ondulado a forte ondulado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Cambissolos, declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 metros.
- iv. Rebordos: correspondem às áreas de relevo ondulado, densidade de drenagem moderada, predominância de Cambissolos, declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1100 metros.
- v. Rampas Íngremes: apresentam padrão de relevo forte ondulado a escarpado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividade superior a 25% e cota altimétrica entre 800 e 1100 metros.

A partir da descrição dos compartimentos percebe-se que as áreas ocupadas por planos elevados e planos intermediários representam os melhores sítios para a efetivação da recarga dos aquíferos, uma vez que esses são os altos regionais da área, que possuem declividades abaixo de 12% e solos mais profundos e permeáveis. Enquanto as áreas de rebordo possuem uma contribuição intermediária para recarga, devido sua declividade que varia entre 10 e 20% e presença de solos menos permeáveis. Já, as áreas ocupadas por rampas íngremes e vales dissecados são menos efetivas em termos da contribuição para a recarga dos aquíferos, tanto por apresentarem declividades superiores a 20% quanto por serem o baixo regional, com altas densidades de drenagem, ou seja, área de descarga local das águas subterrâneas.

Sendo que a ocupação urbana e a atividade agropecuária, também devem ser preferencialmente desenvolvidas nas áreas situadas nos planos elevados e intermediários, uma vez que a declividade nesses compartimentos é menor que 10% e os solos, de forma geral, são mais profundos e bem estruturados, o que propicia o uso

mais intensivo das terras. Caso ocorra ocupação urbana ou rural em áreas situadas nos compartimentos de vale dissecado e de rebordos, a mesma deverá se preocupar com a implantação de infraestrutura adequada para conservação dos solos. Enquanto, as ocupações urbanas e as atividades agropecuárias situadas em áreas de ruptura de declive e de rampas íngremes devem ser restringidas em função das declividades acentuadas e da presença de solos mais rasos, que possuem alta sensibilidade a ruptura e erosão.

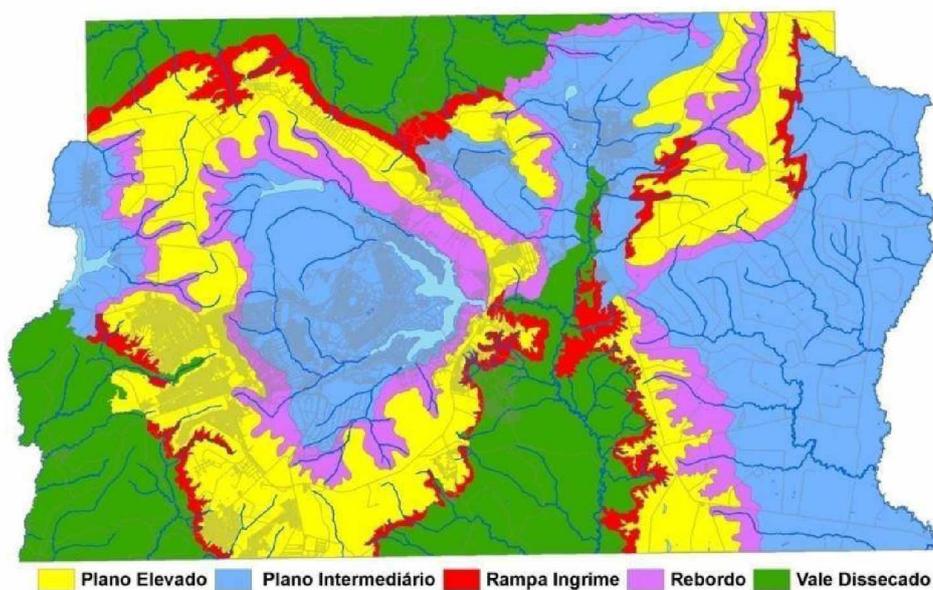


Figura 4.3 - Compartimentação geomorfológica do Distrito Federal. Fonte: GDF & Greentec, 2011

## (ii) Pedologia

No Distrito Federal são três as classes de solos mais representativas em termos de distribuição espacial: latossolos vermelhos e vermelho-amarelos (54% da área do Distrito Federal) e Cambissolos Háplicos (31%). Há ainda outras classes de ocorrência mais restrita, porém, de importância significativa, que merecem destaque: *Gleissolos*, Nitossolos, Plintossolos, Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Flúvicos e Chernossolos (GDF; GREENTEC, 2011; LOUSADA; CAMPOS, 2005; SOUZA, 2013). O conjunto de características desses solos e sua aptidão a urbanização e a recarga, a seguir descrito, decorre de estudos realizados no âmbito do Zoneamento Econômico Ecológico do DF e contam do Relatório Técnico da Empresa Greentec de 2011.

Os Latossolos Vermelho e Vermelho-amarelo são bastante desenvolvidos, formando espessas camadas (da ordem de dezenas de metros). São solos porosos, bastantes permeáveis e pouco plásticos, possuindo resistência à compressão, aos processos erosivos e favorecendo a infiltração. O grupo dos latossolos permite qualquer

tipo de uso urbano, com edificações de diferentes portes, subsolo, instalação de sistemas de saneamento in situ e possuem, de forma geral, os maiores valores de condutividade hidráulica vertical, apresentando as melhores condições para recarga natural e artificial.

Os Cambissolos Háplicos são pouco desenvolvidos e pouco profundos, sendo comum encontrar fragmentos de rocha em seu perfil. Sua primeira camada apresenta altos teores de silte o que, aliado à pequena profundidade, reduz significativamente a sua permeabilidade, favorecendo o desenvolvimento de acentuados processos erosivos e impondo empecilhos à mecanização. Por isso as ocupações urbanas nesses solos, devem ser preferencialmente de baixa densidade, compostas por chácaras ou mansões, evitando a instalação de sistemas de saneamento in situ e subsolos. Esses solos possuem de forma geral os menores valores de condutividade hidráulica vertical, apresentando as piores condições para recarga.

Os Neossolos Quartzarênicos são minerais, pouco desenvolvidos, excessivamente porosos, exibindo profundidades de até dois metros. São solos bastante permeáveis, mas de estrutura fraca, não resistindo a compressão e sendo também suscetíveis a erosão. A ausência total de argila também dificulta a instalação e fixação de raízes. Do ponto de vista urbano há limitações para sistemas de saneamento in situ, escavações e subsolos, porém o solo possui alta condutividade hidráulica, sendo muito favorável a recarga natural.

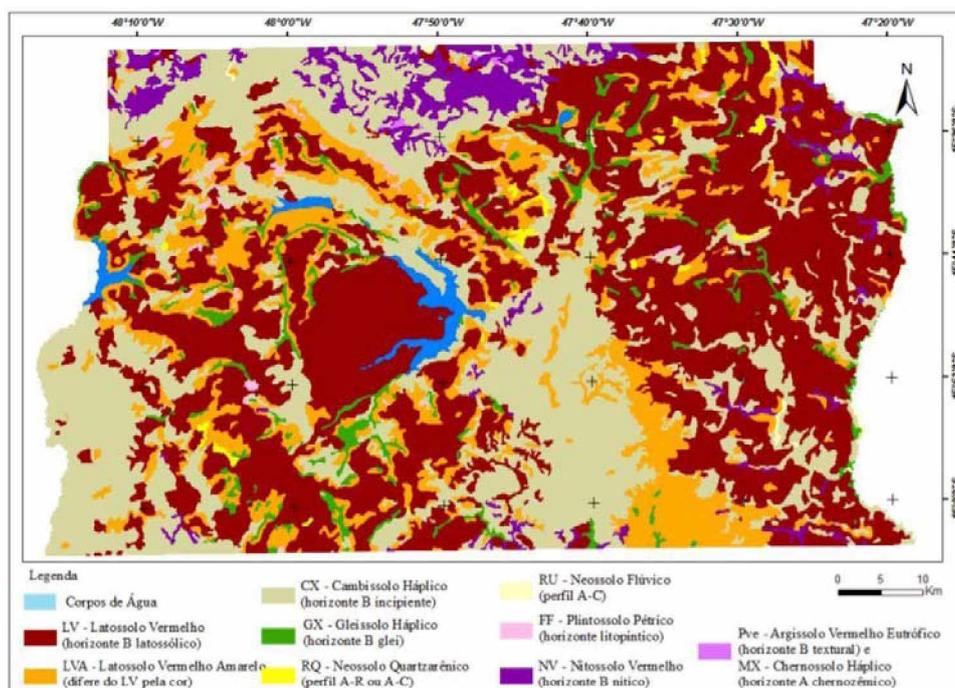
Os Neossolos Flúvicos são pouco desenvolvidos e originados de sedimentos provenientes dos rios nos períodos das altas vazões. A maior limitação destes solos é vinculada ao risco de inundações periódicas. Localmente estes solos podem apresentar elevado conteúdo de argilas o que os torna muito plásticos impondo riscos as fundações e edificações eventualmente implantadas em seus domínios.

Os Gleissolos Háplicos possuem altas taxas de deposição de matéria orgânica, geralmente associados a altos níveis freáticos, estão frequentemente encharcados. As limitações e a sensibilidade ambiental destes solos são muito grandes, tanto que quase em sua totalidade estão associados a áreas de preservação ambiental. As limitações para uso urbano são devidas à sua elevada plasticidade, presença comum de matéria orgânica e baixa permeabilidade.

Os Plintossolos são bastante desgastados, pouco profundos e pouco permeáveis. Estes solos são muito procurados como fonte de material para aterros e revestimento de estradas, pois sua natureza cascalhenta com matriz argilosa permite a formação de

pavimentos estáveis e resistentes aos processos erosivos e compressão. Os Nitossolos vermelhos são profundos e bem desenvolvidos, normalmente associados a altas densidade de drenagens, com argila de baixa atividade. Os Argissolos vermelhos são de profundidade variável e também compostos por argila de baixa atividade.

A partir dessas características percebe-se que os Latossolos Vermelho e Vermelho-amarelo (que cobrem 54% do território) são os solos mais propícios tanto para a recarga dos aquíferos quanto para urbanização, sendo muito importantes para a produção hídrica na região e para ocupação urbana. Enquanto, as áreas que são recobertas por Cambissolos Háplicos (31% do território) não são adequadas para recarga, mas podem ser ocupadas nas áreas de menor declividade, com atenção a preservação do solo devido sua suscetibilidade à erosão. Nos outros 15% do território os Neossolos Quartzarênicos, Nitossolos e Argissolos possuem limitações à ocupação urbana semelhantes aos Cambissolos, porém o Neossolos Quartzarênico, diferente dos demais possui alta condutividade hidráulica, contribuindo também para recarga; Neossolos Flúvicos e os Gleissolos Háplicos devem ser vinculados exclusivamente a preservação ambiental, devido sua sensibilidade a inundações e alta plasticidade; e os Plintossolos apesar de não contribuírem efetivamente para recarga, são adequados para ocupação urbana, devido sua resistência, possuindo inclusive destinações preferenciais supracitadas (ver figura 4.4).



**Figura 4.4** – Mapa de solos do Distrito Federal. Fonte: GONÇALVES 2007, modificado de EMBRAPA, 1978.

### (iii) Clima

De acordo com a classificação de Köppen, o Distrito Federal tem clima do tipo tropical úmido cuja sigla, Aw, remete a um clima tropical com inverno seco. Assim, a marcante sazonalidade climática é sua principal característica: o inverno, compreendido entre os meses de maio e setembro, é frio e seco, e o verão, no período que vai de outubro a abril, é quente e úmido.

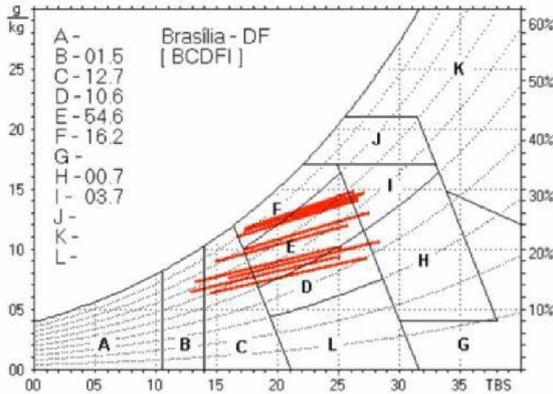


Figura 4.5 - Carta bioclimática do Distrito Federal. Fonte: ABNT NBR 15520

A carta bioclimática<sup>12</sup> do DF mostra que durante a maior parte do ano o território está dentro das zonas de conforto E, onde não são necessárias estratégias de condicionamento térmico para o aumento do conforto (figura 4.5).

No que se refere ao clima o aspecto mais relevante para a recarga dos aquíferos é a análise de como se comporta a precipitação, quanto a altura total precipitada, o intervalo entre chuvas e sua intensidade. A média pluviométrica anual do Distrito Federal varia entre 1.200 e 1.500 mm, o que configura um clima úmido (figura 4.6).

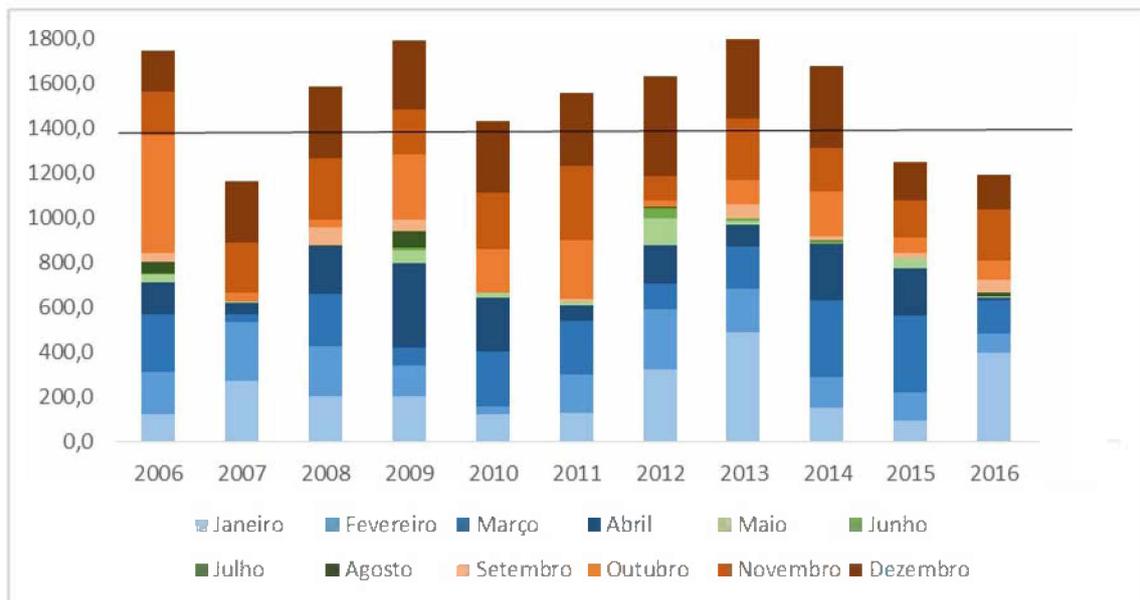
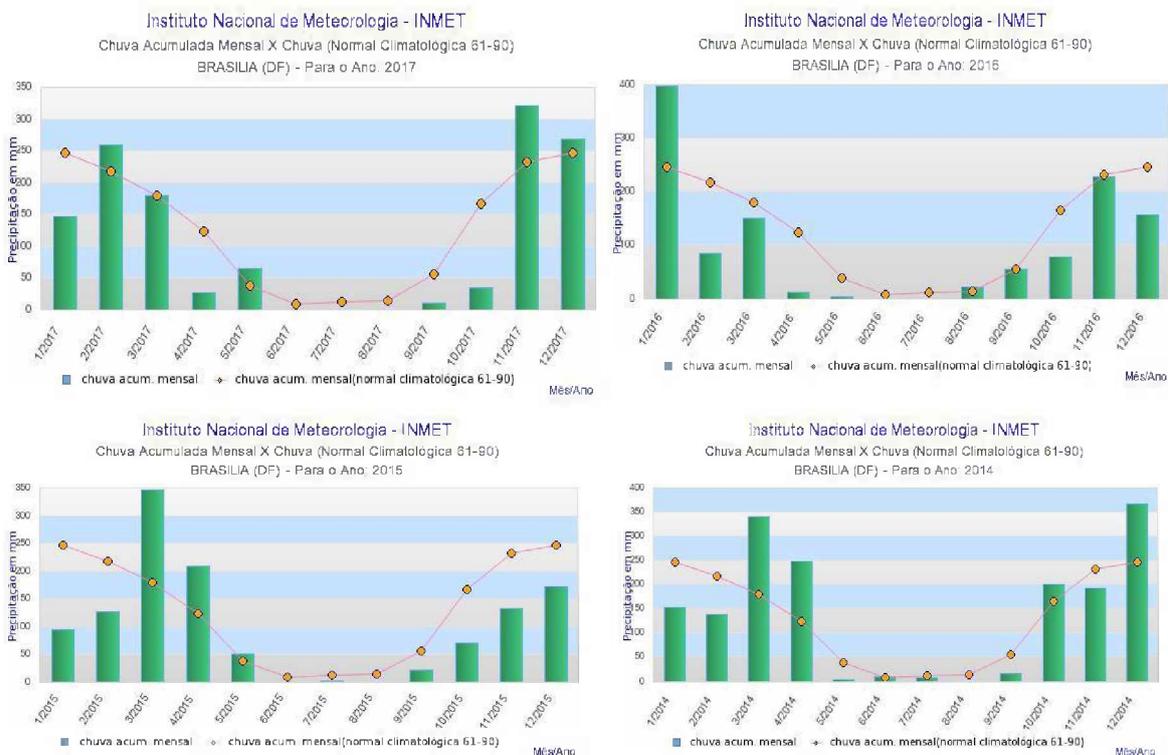


Figura 4.6 – Total pluviométrico anual entre 2006 e 2016 no Distrito Federal. Própria autoria, 2017. Fonte de dados: ANA.

<sup>12</sup>Na carta bioclimática, delimitam-se zonas de confortos com base nas variáveis de temperatura de bulbo seco e umidade relativa, sendo sugeridas diretrizes de ventilação, resfriamento e aquecimento passivos ou artificiais a depender da zona.

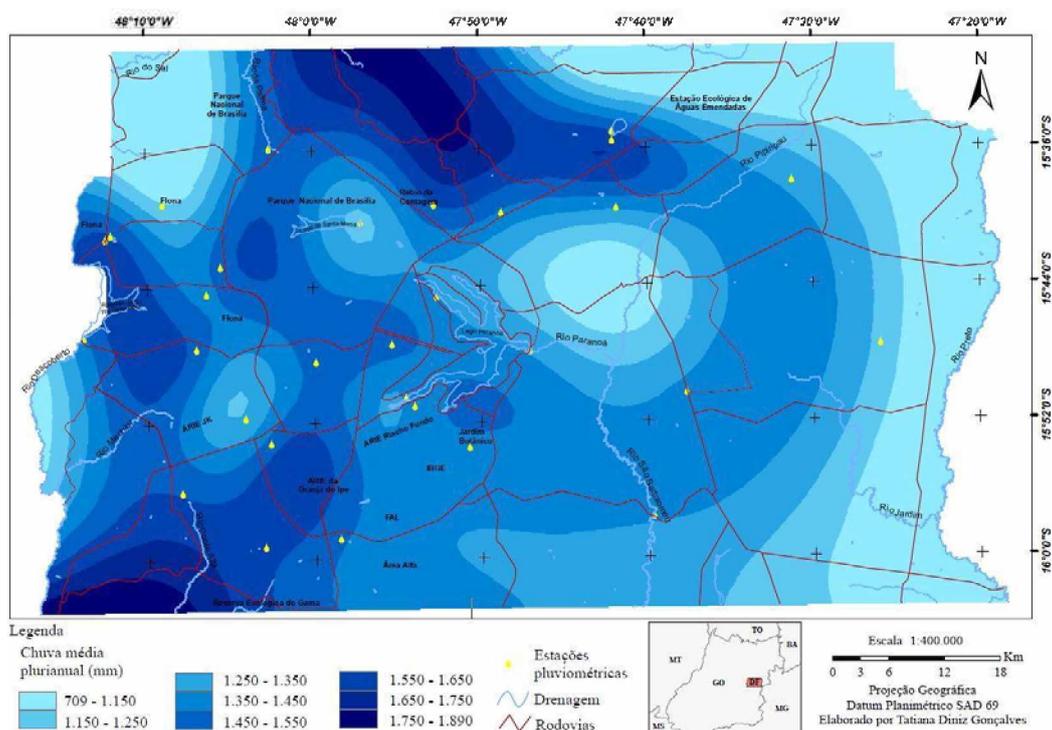
Entretanto, as chuvas não são bem distribuídas durante o ano. O mês de janeiro apresenta o maior índice pluviométrico médio (248 mm/mês), enquanto os meses de junho, julho e agosto registram os menores índices (11 mm/mês) (figura 4.7). Ainda, durante o período seco a insolação é maior que no período chuvoso devido à escassez de nebulosidade, acarretando numa maior evaporação da água (GDF & Greentec, 2011). O resultado é um déficit de água no solo entre os meses de maio e outubro e um superávit entre novembro e abril. O que significa que no início do período chuvoso, o solo está com a umidade abaixo de sua capacidade de campo, de forma que os primeiros dias de chuvas contribuem apenas para recuperar sua umidade. Por outro lado, durante todo o período chuvoso, a taxa de infiltração nos solos pode ser reduzida devido à alta concentração de chuvas, que pode levar a saturação do solo.



**Figura 4.7-** Total pluviométrico mensal entre 2014 e 2017 no Distrito Federal, com normal climatológica de 1961 a 1990. Fonte: INMET.

Gonçalves (2007) a partir de série temporal pluviométrica entre os anos de 1971 a 2006 com dados de 32 postos pluviométricos produziu mapa de isoietas com método de interpolação demonstrando a distribuição média da altura da precipitação no Distrito Federal. Segundo o estudo, as menores médias pluviométricas ocorrem na porção leste do território (com isoietas de 1.200mm) e as mais elevadas estão concentradas em faixas nas porções NW e SW (onde estão distribuídas isoietas de 1600mm). Entretanto,

Gonçalves (2007) destaca que devido à ausência de dados em algumas regiões da bacia dos rios Preto e Maranhão, o processo de interpolação gerou médias pluviométricas inferiores aquelas obtidas nos dados originais, abaixando nesses locais médias de 1.100mm para 700mm. Seguindo dessa ressalva, pode-se afirmar, que apesar da concentração das chuvas nas porções NW e SW do território, as chuvas são bem distribuídas, sendo que na maior parte do território há uma média pluviométrica anual de um mínimo de 1.100mm (figura 4.8).



**Figura 4.8** - Mapa da pluviosidade média no território do Distrito Federal entre 1960 e 2006. Fonte: GONÇALVES, 2007.

A revisão dessas características do meio físico demonstra que no território do Distrito Federal as áreas propícias a urbanização e a recarga dos aquíferos são muito semelhantes, uma vez que as duas ocorrem em áreas de menor declividade (planos elevados e planos intermediários) e que essas áreas coincidem com a maior ocorrência de latossolos vermelho e vermelho-amarelo, que são os solos na região mais propícios tanto para a recarga dos aquíferos, quanto para ocupação urbana. Enquanto os vales e escarpas que apresentam alta declividade, também coincidem com a presença de Cambissolos Háplicos, que são os solos menos adequadas para recarga na região e também oferecem limitações à urbanização. Quanto ao clima, percebe-se que a região apresenta um clima ameno durante maior parte do ano, não sendo um fator de influência

na escolha do local de ocupação. E que apresenta uma altura de chuvas bem distribuída pelo território, que, entretanto, se concentram em quatro meses do ano, afetando as taxas de infiltração de água no solo. Utilizando como base essa caracterização, foi possível espacializar as áreas propícias a recarga de aquíferos e a urbanização no território do Distrito Federal.

#### **(i) Áreas propícias a recarga de aquíferos**

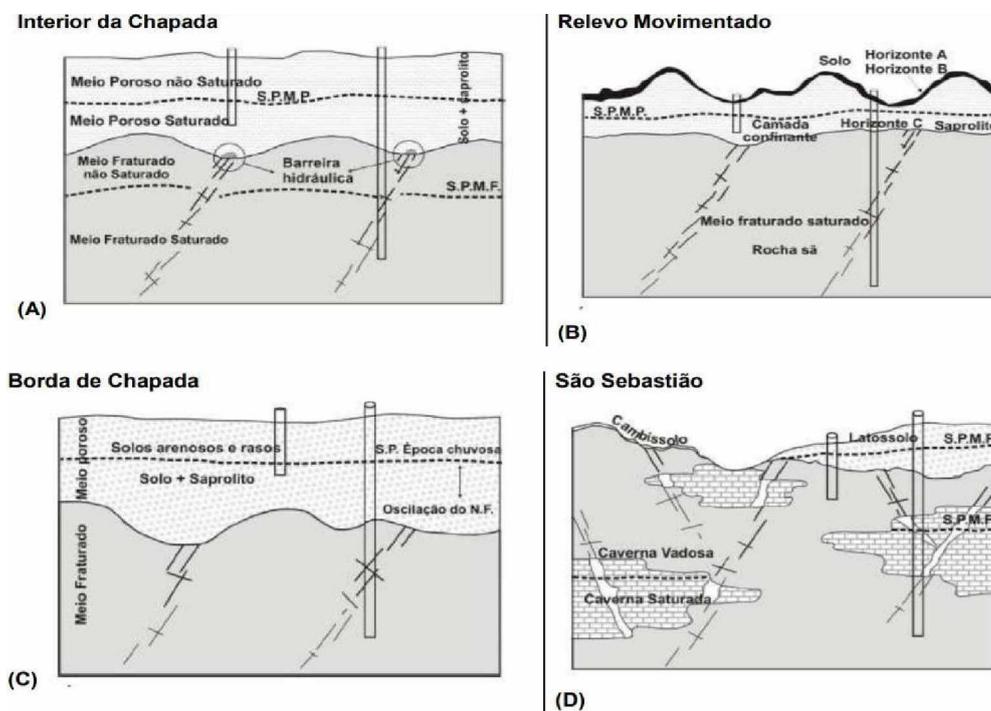
Segundo Oliveira et al. (2015) e Santos & Koide (2016) ainda é pequena a atenção dada à estudos desenvolvidos para a região quanto à quantificação de taxas de recarga e à caracterização espacial do processo, a partir das características intervenientes em sua dinâmica. Sendo que ainda não existem valores precisos de taxas de recarga associadas aos diferentes tipos de solo e cobertura do solo presentes no território estudado, nem um conhecimento adequado acerca de sua variabilidade espacial.

Campos (2004) ao estudar o processo de recarga associado a formações aquíferas do Distrito Federal verificou a forte influência da precipitação na reposição das reservas subterrâneas da região, resultado confirmado por Lousada e Campos (2006), e Pacheco (2012). Sendo que, nesses estudos a ocupação, urbana e rural, descontrolada do solo nessas zonas foi identificada como sendo a causa principal da depleção do nível freático, fator que reforça a importância do conhecimento da distribuição espacial do processo. Também, estudos que procuraram estimar taxas de infiltração em áreas de cerrado stricto sensu, relatam taxas que variam entre 20% a 60% da altura precipitada a depender do tipo de solo (SANTOS; KOIDE, 2016; OLIVEIRA et. al, 2015), demonstrando a importância da vegetação desse bioma para a infiltração.

De modo geral, a condutividade hidráulica do solo e do domínio poroso é o fator mais importante na regulação da recarga em áreas de cerrado (SANTOS; KOIDE, 2016), sendo que na região o domínio dos aquíferos profundos é recarregado principalmente a partir dos aquíferos rasos (LOUSADA & CAMPOS, 2005).

Um estudo de Lousada e Campos (2005) auxilia no entendimento do processo de recarga dos aquíferos profundos do Distrito Federal, a partir de quatro modelos de fluxo da água subterrânea, baseados em contextos de relevo, solo e geologia: (A) o modelo das Duas Superfícies Potenciométricas aplica-se às regiões no interior das chapadas com predominância de latossolos, onde há formação de duas superfícies

potenciométricas, a primeira no aquífero intergranular, que é sustentada por uma barreira formada por argilas que se acumulam no topo do aquífero fraturado, e a segunda formada no interior do próprio aquífero fraturado, sendo que, durante o período chuvoso, o topo do aquífero fraturado pode romper a barreira hidráulica, misturando-se então as duas superfícies; (B) o modelo da Superfície Única com Confinamento, aplica-se às regiões de relevo movimentado com predominância de Cambissolos, em que as rochas estão cobertas por camada de solo pouco desenvolvido e pouco permeável que funcionam como aquitarde, alimentando o aquífero fraturado sotoposto por gotejamento a uma velocidade muito baixa. Sendo que a recarga também pode ocorrer por fluxo lateral a partir de outros sistemas aquíferos; (C) o modelo da Superfície Única sem Confinamento, aplica-se às áreas de relevo suave-ondulado, próximas às quebras de relevo e com cotas intermediárias, onde aquífero fissural é recoberto por espessa camada de solo que favorece a circulação vertical da água de precipitação pluviométrica; (D) o modelo Físsuro-Cárstico, aplica-se às regiões do DF que apresentam rochas carbonáticas, ocorrendo uma ou duas superfícies potenciométricas a depender da espessura da camada de solos sobreposta, sendo que a circulação é eminentemente vertical devido às limitações relativas ao fraturamento das rochas.



**Figura 4.9** – Quatro modelos conceituais de fluxo da água subterrânea para o Distrito Federal desenvolvidos por Lousada e Campos (2005). Fonte: SOUZA, 2013

O governo do Distrito Federal dispõe de dois mapas de recarga de aquífero. Um foi desenvolvido por Gonçalves (2007) e é utilizado pela agência reguladora de águas do Distrito Federal – ADASA, como informação para a gestão das águas subterrâneas na região. Esse mapa foi desenvolvido cruzando dados de: (1) cobertura do solo, separadas em sete classes: (i) corpos d'água; (ii) áreas verdes; (iii) urbano de baixa densidade construtiva, até 40%, que abrangeu área do Park Way; (iv) urbano de média densidade construtiva, até 70%, que abrangeu Plano Piloto e Lagos; (v) urbano de alta densidade construtiva; mais de 70%, que abrangeu as demais áreas urbanas; (vi) agropecuária; (vii) e áreas impermeáveis; (2) classificação dos solos de acordo com suas propriedades hidrológicas em quatro grupos: (a) condutividade hidráulica entre  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  m/s até 2m de profundidade, onde ficaram os Latossolos e Neossolo Quartzarênico; (b) entre  $10^{-5}$  e  $10^{-6}$  m/s decaindo após 1m onde ficaram Nitossolo, Argissolo e Chernossolo; (c) variável com tendência a diminuição rápida onde ficaram Plintossolo Pétrico e Neossolo Flúvico; e (d) entre  $10^{-7}$  e  $10^{-8}$  m/s em até 1m de profundidade, onde ficaram Gleissolo Háplico; (3) a pluviometria média; (4) e declividade.

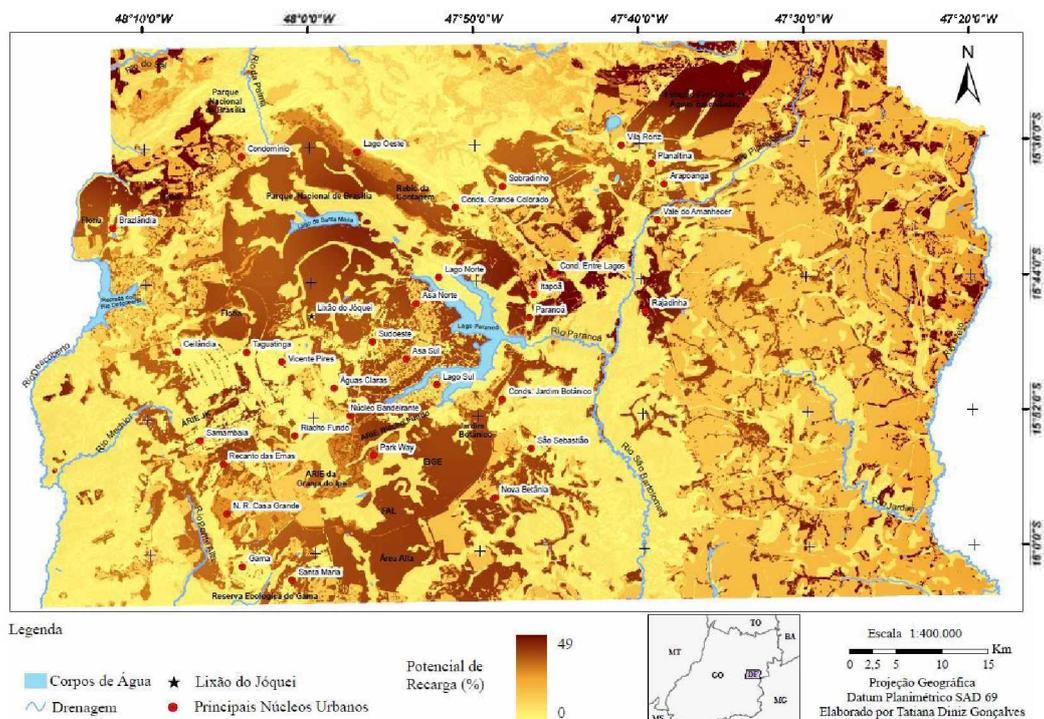
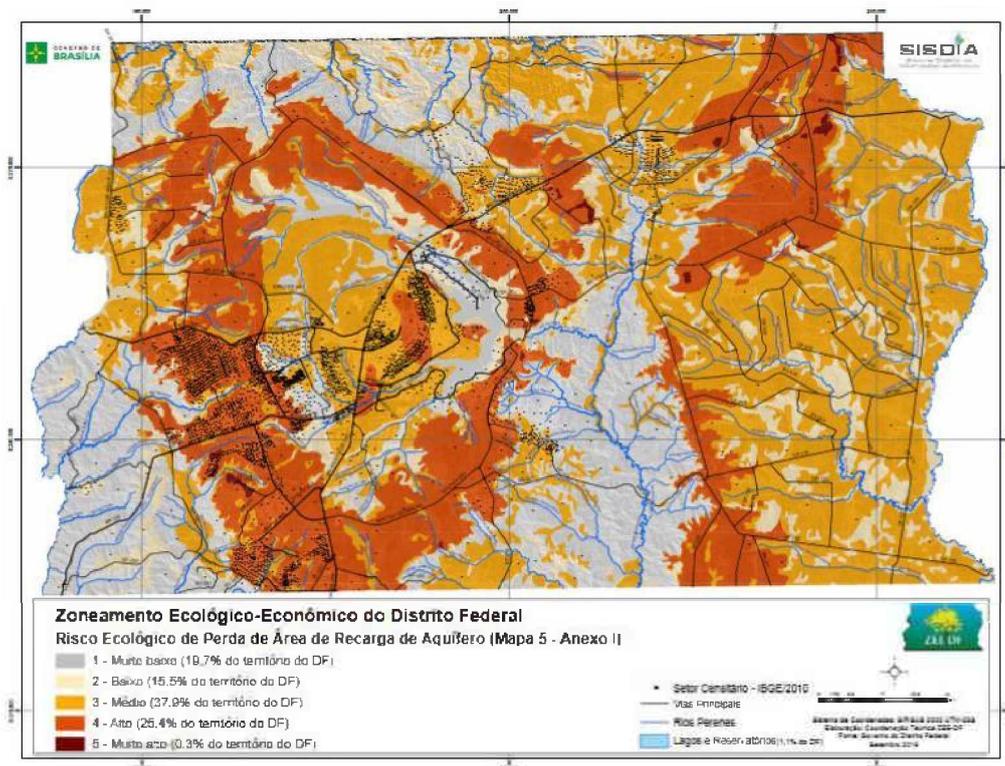


Figura 4.10 – Mapa do potencial de recarga dos aquíferos do Distrito Federal. Fonte: Gonçalves, 2007.

Os parâmetros do mapa de Gonçalves (2007) foram agregados e o resultado desse cruzamento foi traduzido numa porcentagem potencial de infiltração da água da chuva, conforme figura 4.10. No entanto, de acordo com Mello e Castro (2011), os valores de taxa de infiltração do referido mapa são ainda apenas uma aproximação sujeita a muita incerteza, uma vez que o nível de conhecimento acerca dos fatores que regem o processo ainda é insuficiente para fazer esse tipo de estimativa, principalmente em áreas urbanas e de cerrado.

O outro mapa de recarga de aquífero do governo do Distrito Federal foi desenvolvido no âmbito do Zoneamento Econômico Ecológico do Distrito Federal, ZEE/DF para compor um de seus quatro mapas de riscos ecológicos (GDF, 2017). Esse mapa mensura o nível do risco de redução da recarga e produção hídrica dos aquíferos a partir do cruzamento de três fatores: (1) condutividade hidráulica do domínio dos aquíferos intergranulares ou porosos, separando-os em cinco grupos: (a) os Neossolos Quartzarênicos, com maiores taxas de condutividade hidráulica; (b) Latossolos, com condutividade superior a  $10^{-6}$  m/s; (c) Nitossolos, Chernossolos e Argissolos, com condutividade que varia entorno de  $10^{-6}$  m/s; (d) Plintossolos, Gleissolos e Espodosolos, com condutividade inferior a  $10^{-6}$ m/s; e (e) os Cambissolos, Neossolos Litólicos e Flúvicos, com valores muito baixos de condutividade; (2) compartimentações geomorfológicas, separando em cinco grupos: (i) planos elevados; rebordos; (ii) planos intermediários; (iii) vales dissecados; (iv) rampa íngremes; e (3) níveis de vazão dos domínio dos aquíferos fraturados e fissuro-cársticos, separando-os em quatro grupos: (i) níveis acima de  $12\text{m}^3/\text{h}$ ; (ii) níveis acima de  $9\text{m}^3/\text{h}$ ; (iii) níveis acima de  $6\text{m}^3/\text{h}$ ; (iv) e níveis abaixo de  $4,5\text{m}^3/\text{h}$  (GDF, 2017).

Para o cruzamento dos três fatores que compõem o Mapa de Risco Ecológico de Perda de Recarga de Aquíferos do ZEE/DF foi atribuído valores, que variam de 1 a 5, para cada uma das variáveis em ordem que representa de forma crescente o risco de redução da recarga e produção hídrica dos aquíferos. Esses valores foram então agregados, utilizando uma média ponderada, onde, devido a importância da condutividade hidráulica para o fenômeno medido, esta teve peso duplo. O resultado da combinação dos fatores pode ser visto na figura 4.11.



**Figura 4.11** - Mapa de risco ecológico de perda de recarga de aquífero do ZEE/DF. Fonte: GDF, 2017.

Esses mapas possuem relevância na caracterização do meio físico no DF, entretanto não se adequam de forma diretamente a análise da presente pesquisa, dado que o objetivo da mesma é verificar as zonas de maior potencial à recarga natural dos aquíferos, com base somente nas características do meio físico estudadas nos capítulos anteriores, sem atribuir um valor fixo ao potencial de recarga de diferentes formas de ocupação, para posteriormente verificar sua relação com os padrões de ocupação urbana do território.

O mapa desenvolvido por Gonçalves (2007) e utilizado pela ADASA já considera em sua construção, além das características do meio físico discutidas, as diferentes coberturas do solo (agrícola, urbano, etc.), atribuindo taxas fixas de recarga a cada uma delas, o que vai de encontro ao objetivo da pesquisa. Já o mapa desenvolvido pelo ZEE/DF, possui o objetivo de avaliar conjuntamente a questão da recarga e da produção hídrica, levando em consideração, além das características do meio físico relevantes para a recarga, a vazão de aquíferos profundos na caracterização das áreas de sensibilidade (GDF & Greentec, 2011).

À vista disso, foi construído pela autora para a pesquisa um mapa de potencial de recarga a partir do cruzamento das características do meio físico discutidas

anteriormente: (1) geomorfológicas (declividade e altitude); e (2) pedológicas (condutividade hidráulica e espessura dos solos). A distribuição pluviométrica não foi levada em consideração devido sua alta variabilidade temporal e distribuição razoavelmente equânime pelo território, como demonstrado no item anterior.

Assim, com base nos métodos de planejamento ecológico estudados no capítulo 01 desta pesquisa principalmente na metodologia desenvolvida por Crepani et al. (2001) também utilizada pelo ZEE/DF, foram atribuídos para os cada um dos compartimentos geomorfológicos valores representativos do potencial de recarga de aquíferos, com base na altitude relativa e declividade, tendo em vista a influência desses fatores na taxa máxima de entrada da água no solo e no fluxo vertical e lateral das águas subterrâneas. Os valores atribuídas aos compartimentos, uma vez que no Distrito Federal existem cinco compartimentos geomorfológicos com comportamentos distintos em relação a recarga dos aquíferos, variam de 1 a 5, sendo que 1 representa o menor potencial e 5 o maior para a recarga (ver tabela 4.3).

**Tabela 4.3** – Classificação, quanto ao potencial de recarga, das compartimentações geomorfológicas do Distrito Federal de acordo com variação de declividade e altitude relativa. Própria autoria, 2018.

<b>Compartimentações Geomorfológicas (GDF &amp; Greentec, 2011)</b>	<b>Principais características</b>	<b>Potencial de Recarga</b>	<b>Valor</b>
Rampas Íngremes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo forte ondulado a escarpado</li> <li>• Declividades superiores a 25%</li> </ul>	Muito baixo	1
Vales Dissecados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo ondulado a forte ondulado</li> <li>• Declividades superiores a 20%</li> <li>• Baixo regional, com cotas altimétricas inferiores a 800m</li> </ul>	Baixo	2
Rebordos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo ondulado</li> <li>• Declividades entre 10% e 20%</li> </ul>	Moderado	3
Planos Intermediários	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo plano a suave ondulado</li> <li>• Declividades inferiores a 12%</li> <li>• Alto regional, com cotas altimétricas entre 950 e 1050m</li> </ul>	Alto	4
Planos Elevados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo plano a suave ondulado</li> <li>• Declividades inferiores a 10%</li> <li>• Alto regional, com cotas altimétricas superiores a 1.100m</li> </ul>	Muito alto	5

Para os tipos de solos também foram atribuídas valores representativos do potencial de recarga dos aquíferos com base em suas características hidrológicas, principalmente a condutividade hidráulica e espessura, tendo em vista a influência desses fatores na taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento. Como a caracterização dos sistemas dos aquíferos rasos, formados pelos solos e saprolitos, também levam em consideração os mesmos parâmetros há uma relação entre a

classificação dos sistemas de aquíferos rasos e das variáveis representativas do potencial de recarga da pesquisa. Os valores atribuídos também variam de 1 a 5, sendo que 1 representa o menor potencial e 5 o maior (ver tabela 4.4).

**Tabela 4.4** - Classificação quanto ao potencial de recarga dos tipos de solo do Distrito Federal, de acordo com variação condutividade hidráulica e espessura. Própria autoria, 2018.

Sistema aquíferos rasos	Tipos de solos	Principais características	Potencial de Recarga	Valor
Sistema P1	Neossolos Quartzarênicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos muito profundos (&gt; 200cm)</li> <li>• Condutividade hidráulica comumente entre comumente próxima de <math>2,8 \times 10^{-4}</math></li> </ul>	Muito alto	5
Sistema P1	Latosolos Vermelho e Vermelho-Amarelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos muito profundos (&gt;200cm)</li> <li>• Condutividade hidráulica comumente entre <math>1,7 \times 10^{-5}</math> a <math>10^{-6}</math>.</li> </ul>	Alto	4
Sistema P2	Argissolos vermelhos e Nitossolos vermelhos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos profundos (entre 100 e 200cm)</li> <li>• Condutividade hidráulica entre <math>10^{-5}</math> e <math>10^{-6}</math> m/s</li> </ul>	Moderado	3
Sistema P3	Plintossolos Pétricos, Gleissolo Háptico e Neossolo Flúvico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos pouco profundos (entre 50 e 100 cm)</li> <li>• Condutividade hidráulica comumente entre <math>2,3 \times 10^{-6}</math> a <math>1,4 \times 10^{-7}</math></li> </ul>	Baixo	2
Sistema P4	Cambissolo Háptico e Neossolo Litólico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solos profundos a rasos (entre 0 e 200cm)</li> <li>• Condutividade hidráulica comumente entre <math>10^{-7}</math> e <math>10^{-8}</math> m/s</li> </ul>	Muito Baixo	1

De posse desses valores, que variam de 1 a 5, atribuídos as duas variáveis, tipos de solos (Sr) e compartimentações geomorfológicas (Gr), de acordo com seu potencial de recarga a partir das características avaliadas, o mapa de potencial de recarga dos aquíferos da pesquisa foi construído a partir o cruzamento das variáveis por meio de uma média aritmética ponderada, em ambiente de sistema de informações geográficas, conforme metodologia de Crepani et al. (2001), utilizando a seguinte equação:

$$Pr = \frac{2Sr + Gr}{3}$$

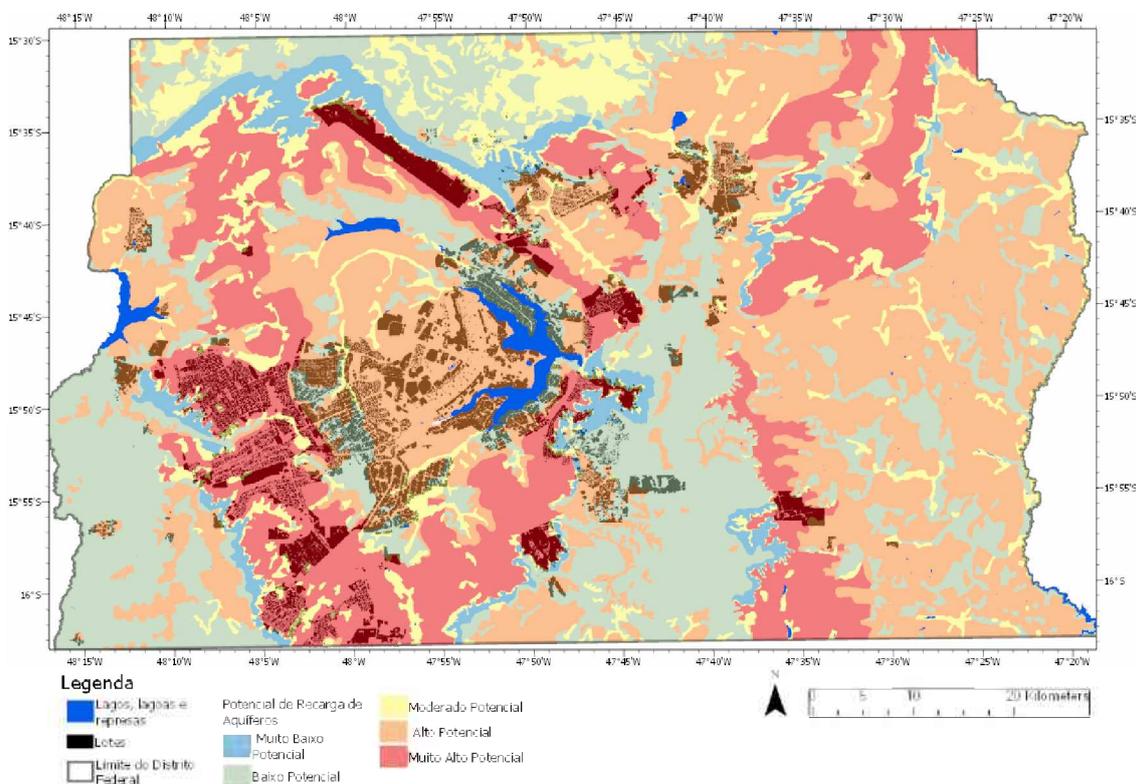
Onde:

Pr = Potencial de recarga dos aquíferos;

Sr = Valores de potencial de recarga atribuídos aos tipos dos solos;

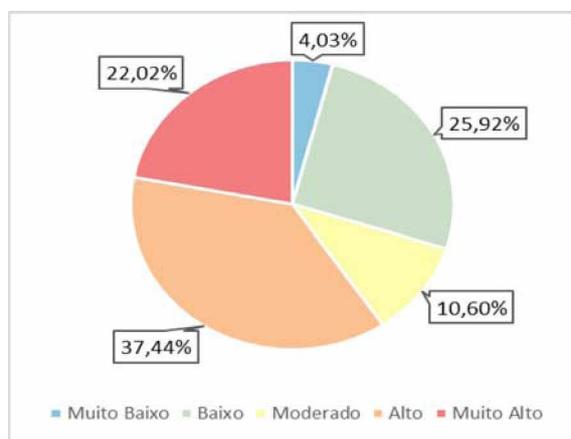
Gr = Valores de potencial de recarga atribuídos às compartimentações geomorfológicas.

O peso dois atribuído ao potencial de recarga dos tipos de solo, que também foi utilizado na metodologia do ZEE/DF, se deve a maior importância desse domínio para o processo de recarga (dos aquíferos rasos e profundos) já reconhecido na literatura (LOUSADA; CAMPOS, 2005; SANTOS; KOIDE, 2016).



**Figura 4.12** – Mapa de potenciais de recarga do Distrito Federal. Própria autoria, 2018. Com dados de ZEE/DF e Siturb.

De acordo com os resultados, o território se divide em cinco regiões quanto ao seu potencial de recarga dos aquíferos: (1) muito baixo, que corresponde a 4,03% do território; (2) baixo, que corresponde a 23,92% do território; (3) moderado, que corresponde a 10,60% do território; (4) alto, correspondendo a 37,44% do território; (5)



muíto alto, correspondendo a 22,02% do território. Sendo que as áreas onde é mais importante manter as características naturais do solo e coberturas do solo que permitam e/ou auxiliem a entrada de água são as regiões de alto e muito alto potencial, que juntas correspondem a **59,45% do território**.

**Figura 4.13** - Percentuais ocupados pelos diferentes potenciais de recarga. Própria autoria, 2018.

**Tabela 4.5** – Áreas e percentuais do território do Distrito Federal que representam as diferentes categorias de potencial de recarga. Própria autoria, 2018.

Potencial de recarga	Área (ha)	% do total	% do total
Muito baixo	23.082,60	4,03%	40,55%
Baixo	148.571,02	25,92%	
Moderado	60.793,16	10,60%	
Alto	214.633,44	37,44%	59,45%
Muito alto	126.211,70	22,02%	

## (ii) Áreas propícias a ocupação urbana

Para construção do mapa de potencial de urbanização do Distrito Federal, também foi utilizada a base de dados do ZEE/DF e as metodologias de planejamento ecológico estudadas no capítulo 01 desta pesquisa, a partir do cruzamento das características do meio físico: geomorfológicas (declividade) e pedológicas (resistência a cargas, permeabilidade e coesão). A distribuição das características climáticas que influenciam no conforto da população, não possui muita variabilidade espacial e por isso não foi considerada na construção do mapa.

Para os compartimentos geomorfológicos foi atribuído uma variável representativa do potencial de urbanização com base na declividade de cada compartimento, tendo em vista que esse fator é o que mais afeta a possibilidade de mecanização dos processos de urbanização e a possibilidade de ruptura e erosão do solo. As variáveis atribuídas aos compartimentos, variaram de 1 a 4, sendo que 1 representa o menor potencial e 4 o maior (ver tabela 4.6).

**Tabela 4.6** – Classificação quanto ao potencial de urbanização das compartimentações geomorfológicas do Distrito Federal, de acordo com variação de declividade. Própria autoria, 2018.

Compartimentações Geomorfológicas (GDF & Greentec, 2011)	Principais características	Potencial de urbanização	Valor
Rampas Íngremes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo forte ondulado a escarpado</li> <li>• Declividades superiores a 25%</li> </ul>	Baixo	1
Vales Dissecados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo ondulado a forte ondulado</li> <li>• Declividades superiores a 20%</li> </ul>	Moderado	2
Rebordos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo ondulado</li> <li>• Declividades entre 10% e 20%</li> </ul>	Alto	3
Planos Intermediários e Plano Elevados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevo plano a suave ondulado</li> <li>• Declividades inferiores a 12%</li> </ul>	Muito alto	4

Para os tipos de solos também foi atribuído uma variável representativa do potencial de urbanização com base em sua resistência a cargas, permeabilidade e

coesão. As variáveis atribuídas também variam de 1 a 4, sendo que 1 representa o menor potencial e 4 o maior (ver tabela 4.7).

**Tabela 4.7** - Classificação quanto ao potencial de urbanização dos tipos de solo do Distrito Federal, de acordo com variação resistência à cargas, coesão e permeabilidade. Própria autoria, 2018.

Tipos de solos	Principais características	Potencial de urbanização	Valor
<b>Latossolos Vermelho e Vermelho- Amarelo</b>	Solos porosos, bastantes permeáveis, pouco plásticos, boa resistência à cargas e processos erosivos	Muito alto	4
<b>Plintossolo Pétrico</b>	Solos pouco permeáveis, muito resistente à cargas e processos erosivos	Alto	3
<b>Cambissolo Háplico, Nitossolo, Argissolo, Neossolos Quartzarênicos</b>	Solos pouco à muito permeáveis, pouco resistentes e suscetíveis a erosão	Moderado	2
<b>Gleissolo Háplico e Neossolo Flúvico</b>	Solos pouco permeáveis, frequentemente encharcados, muito argilosos, muito plásticos e muito pouco resistentes	Baixo	1

De posse dos valores de 1 a 4 atribuídos as duas variáveis (1) tipos de solos; e (2) compartimentações geomorfológicas, obteve-se uma média aritmética ponderada, em ambiente de sistema de informações geográficas, do nível de potencial de urbanização, utilizando a seguinte equação (figura 4.14):

$$P_u = \frac{S_u + G_u}{2}$$

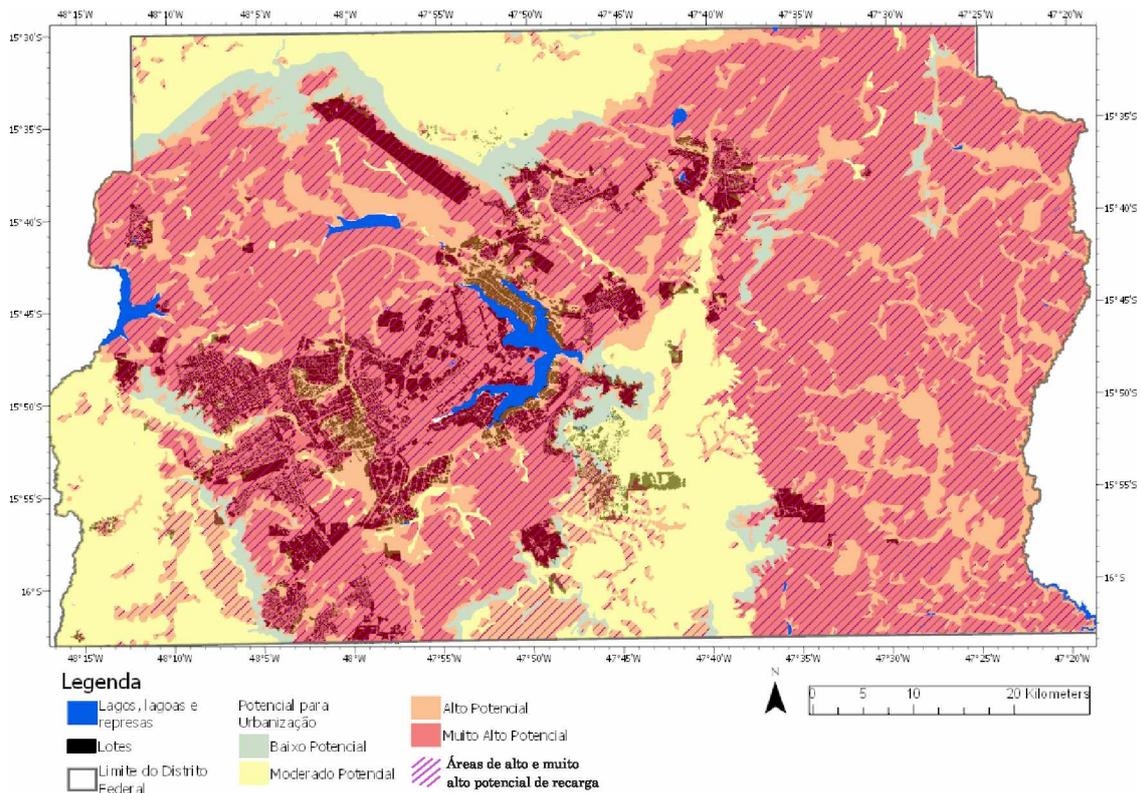
Onde:

$P_u$  = Potencial de urbanização;

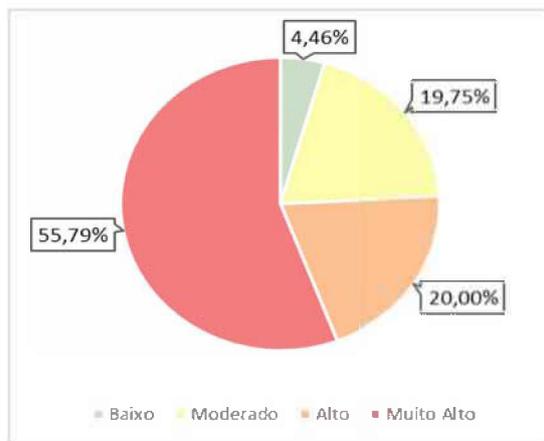
$S_u$  = Valores de potencial de urbanização atribuídos aos tipos dos solos;

$G_u$  = Valores de potencial de urbanização atribuídos às compartimentações geomorfológicas.

Foi utilizado o mesmo peso para as variáveis do tipo de solo e compartimentações geomorfológicas porque foi considerado que essas variáveis possuem a mesma importância para a urbanização. A declividade, vista a partir das compartimentações geomorfológicas, representam um verdadeiro limitante a mecanização e estabilidade do solo, sendo inclusive sua ocupação limitada por lei (Lei nº 6.766/1979), enquanto as características de resistência a cargas e coesão são as mais levadas em consideração pela engenharia civil para o projeto de estruturas.



**Figura 4.14** – Mapa de potenciais de urbanização do Distrito Federal. Própria autoria, 2018. Com dados de ZEE/DF e Siturb.



**Figura 4.15** - Percentuais ocupados pelos diferentes potenciais de urbanização. Própria autoria, 2018.

De acordo com os resultados, o território se divide em quatro regiões quanto ao seu potencial de urbanização: (1) baixo, que corresponde a 4,46% do território; (2) moderado, que corresponde a 19,75% do território; (3) alto, que correspondendo a 20,00% do território; (4) muito alto, correspondendo a 55,79% do território. Como esperado, pela revisão dos fatores do meio físico condicionantes do processo de recarga e da urbanização, as áreas de muito alto potencial para a urbanização estão completamente sobrepostas às áreas de alto e muito alto potencial de recarga (ver figura 4.14).

**Tabela 4.8** – Áreas e percentuais do território do Distrito Federal que representam as diferentes categorias de potencial de urbanização. Própria autoria, 2018.

Potencial de recarga	Área (ha)	% do total	% do total
Baixo	25.472,97	4,46%	24,21%

<b>Moderado</b>	112.791,03	19,75%	
<b>Alto</b>	114.244,88	20,00%	75,79%
<b>Muito alto</b>	318.634,12	55,79%	

### 4.3. Processo de ocupação urbana no Distrito Federal

Diante da espacialização das áreas favoráveis à recarga e à urbanização no território do Distrito Federal, a partir dos condicionantes do meio físico, fica evidente a alta correlação entre as duas áreas e a importância de considerar a variável da recarga no planejamento urbano, principalmente quanto a escolha das áreas de expansão e formas de ocupação. Diante disso, foi analisado nesse tópico processo de decisão de ocupação urbana do território do Distrito Federal e sua relação com as áreas de alto e muito alto potencial de recarga. Para essa análise foram cruzados, por meio do software ArcGIS, as informações dos zoneamentos dos planos de ordenamento territorial do Distrito Federal (PEOT/77, POUISO/86, PDOT/92, PDOT/97 e PDOT/09-12), com o mapa de potências de recarga de aquífero citado no tópico anterior<sup>13</sup>.

O processo de urbanização do Distrito Federal é marcado por uma particularidade que o difere do processo de urbanização da maioria das cidades brasileiras, dado que foi previamente munido de estudos sobre o meio físico para sua localização e ocupação. Uma breve contextualização histórica dá uma ideia das preocupações de natureza técnica que estavam envolvidas na criação de uma nova capital para o País.

Após a declaração de independência e instituição da República em 1889, a primeira constituição republicana, de 1891, declara a cidade do Rio de Janeiro sede provisória do Poder Federal e institui prazo para estudos de implantação da nova capital no território do planalto central (Art. 3, REPUBLICA DOS ESTADOS UNIDOS DO BRAZIL, 1891). Seguindo essa determinação a Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil realizou durante duas missões – que se concluíram no final 1895 – estudos sobre aspectos do meio físico território para fins da definição da localização da nova capital, estando entre eles estudos geológicos, pedológicos, astronômicos, botânicos, do clima, abastecimento de água, topografia entre outros (CODEPLAN, 1995). A partir dos estudos foi definido o “Retângulo Cruls” para sede do futuro Distrito Federal, com área de 14.400km<sup>2</sup>, abrangendo nascentes das bacias do Amazonas, São Francisco e Paraná (figura 4.16). Bem como, descreveu o local

<sup>13</sup> Ver mais detalhes no apêndice A – análise das macrozonas urbanas.

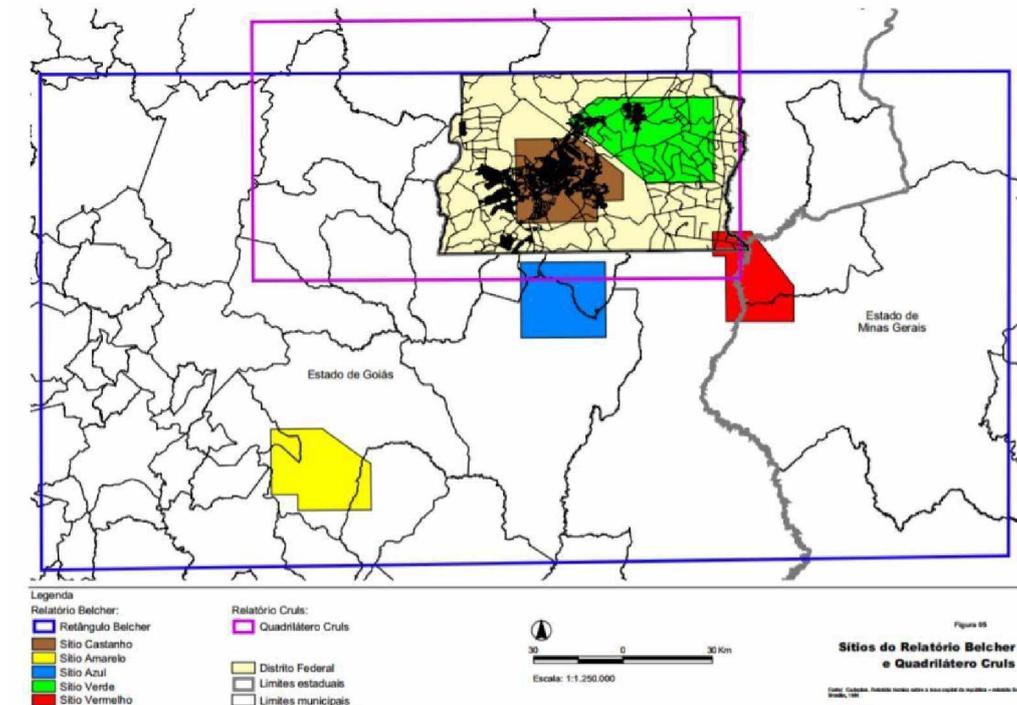
preferencial para implantação da futura cidade, no mesmo local onde, após exaustivos estudos na década de 1950, foi escolhido o embrião da cidade de Brasília (DUARTE DE BRITO, 2009).

Após esse período, a mudança da capital ficou esquecida até 1946, quando foi nomeada mais uma comissão para aprofundar os estudos de transferência da capital que (PAVIANI, 2007), que ampliaram a poligonal do Relatório Cruls (figura 4.16) e fundamentaram medida provisória que foi oficializada pela Lei Federal nº 1.803/53, autorizando o poder executivo a contratar estudos definitivos para mudança da capital, que deveriam avaliar a possibilidade de implantação de uma cidade para 500.000 habitantes, quanto ao: clima e salubridade; facilidade de abastecimento de água e energia elétrica; facilidade de acesso às vias de transporte terrestres e aéreas; topografia adequada; solo favorável às edificações; existência de materiais de construção; proximidade de terras para cultura; e paisagem atraente (BRASIL, 1953).

A comissão contratou a empresa brasileira Cruzeiro do sul, para realizar o levantamento aerofotogramétrico, e firma americana, Donald J. Belcher and Associates, para interpretação do material e determinação dos cinco melhores sítios para implantação da cidade— resultando no trabalho conhecido como “Relatório Belcher”, de 1955 (DUARTE DE BRITO, 2009). O apontamento das cinco alternativas de sítios para a construção da capital (sítios vermelho, amarelo, azul, verde e castanho) se deu a partir da análise das características do meio físico do território, como o clima, o solo, a disponibilidade de água e o potencial para gerar energia elétrica (figura 4.16). A escolha final recaiu sobre o sítio castanho, mesmo sítio que já havia sido indicado anteriormente pelo relatório Cruls. O sítio abrange a Bacia do Lago Paranoá e se encontra no domínio geomorfológico do Plano Intermediário, com predominância de Latossolos, declividades inferiores a 12% e cotas altimétricas entre 950 e 1050 metros, numa área de alto potencial à recarga de aquíferos e muito alto potencial à urbanização.

O engenheiro designado pela Comissão para avaliar o Relatório Belcher, quanto ao esquema de água e esgoto, ponderou que o problema do abastecimento de água não foi convicentemente estudado. Apontando que o Relatório desconsiderou problemas técnicos pertinentes ao abastecimento com águas subterrâneas, onde é preciso conhecer não apenas a existência de acúmulo de líquidos, mas ainda, as condições de recarga pelas águas pluviais e a determinação de permeabilidade dos terrenos (COMISSÃO DE COOPERAÇÃO PARA MUDANÇA DA CAPITAL, 1955). Segundo o engenheiro:

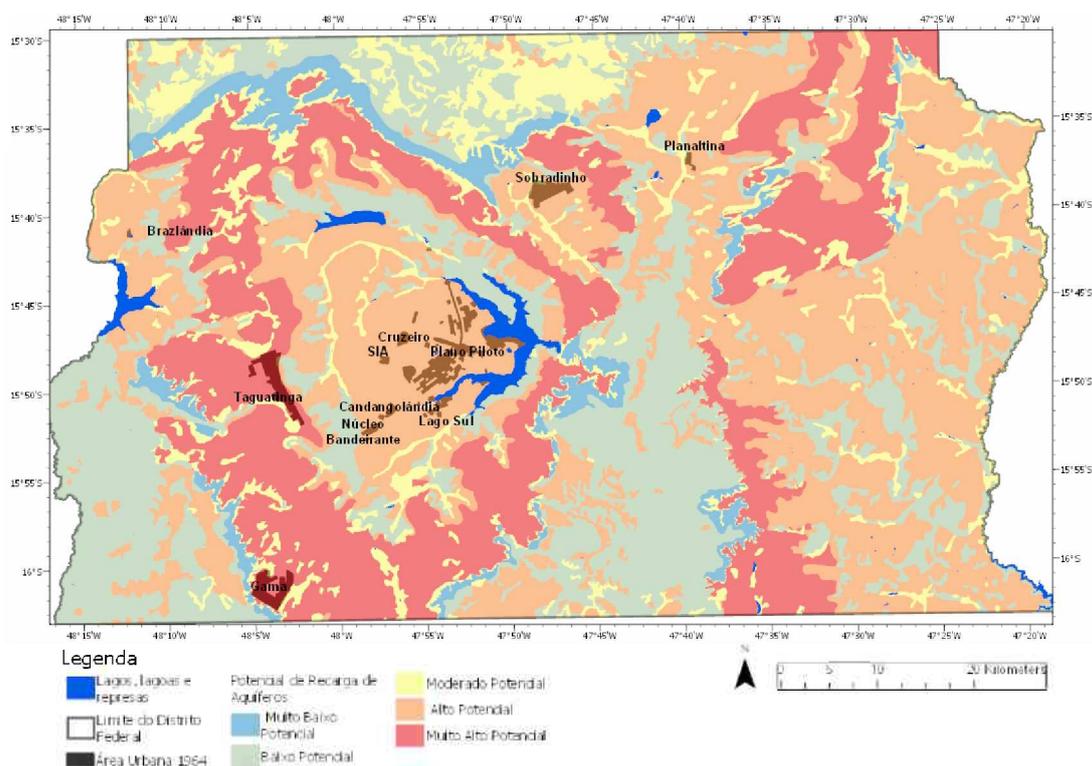
“torna-se necessário que a Comissão providencie a efetivação de estudos objetivos para um juízo satisfatório sobre a capacidade de abastecimento d’água, a fim de que na futura capital federal não se venha verificar após certo tempo condições de penúria d’água...” (COMISSÃO DE COOPERAÇÃO PARA MUDANÇA DA CAPITAL, 1955, p. 108)



**Figura 4.16** - Quadrilátero Cruls e Retângulo Belcher, com as 5 áreas escolhidas pelo Relatório Belcher e a delimitação definitiva do Distrito Federal, traçada em 1955. Fonte: MANCINI, 2008

A decisão de criar o lago foi resultado desse relatório, visando a geração de eletricidade, paisagismo e recreação. Essa decisão foi anterior ao concurso do plano piloto de Brasília, e constou das plantas à disposição dos concorrentes — juntamente com o Palácio da Alvorada, o Brasília Palace Hotel e o Aeroporto. O lago começou a se formar já em 1959 e a usina hidrelétrica foi concluída em 1960.

A primeira área oficialmente ocupada decorre do projeto urbanístico ganhador do "Concurso Nacional do Plano Piloto da Nova Capital do Brasil", de autoria de Lúcio Costa, que começou a ser implantado em 1957. A área do projeto pautou-se nas orientações do Relatório Belcher para a definição de sua localização física, sobretudo no que concerne os mananciais e drenagem pluvial, propondo a ocupação urbana unicamente na margem oeste do Lago Paranoá como forma de facilitar o esgotamento sanitário e realçar a majestosa paisagem característica do sítio (CARPINTERO, 1998).



**Figura 4.3**– Mapa da sobreposição da área urbanizada em 1964 ao mapa de potenciais de recarga de aquíferos. Própria autoria, 2018. Dados do ZEE/DF e Siturb.

O plano urbanístico de Lucio Costa para o Plano Piloto abrangia pequena área da Bacia do Paranoá e previa que, apenas quando este atingisse cerca de 500.000 habitantes deveriam ser implantadas outras cidades autônomas fora de seus limites (MANCINI, 2008), **norteados pelo entendimento de que havia escassez dos recursos hídricos no território sendo fundamental proteger a bacia do Paranoá para prevenir futuros problemas** (GDF, 2008).

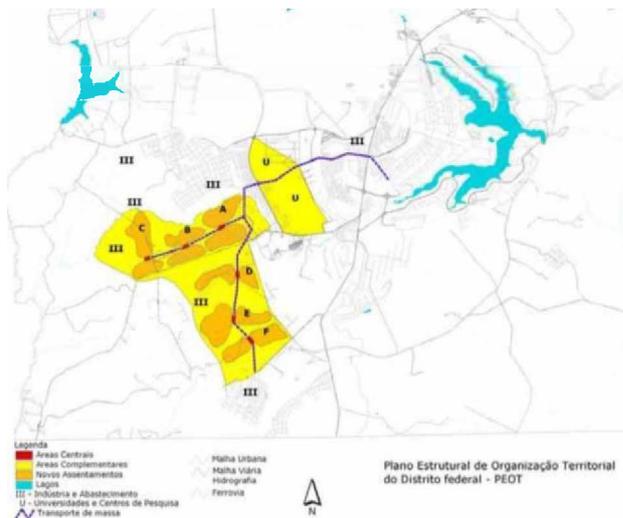
Assim, na década de 1970 o Plano Diretor de Águas, Esgotos e Controle da Poluição – PLANIDRO, mantém a recomendação para não-ocupação dos espaços livres remanescentes na Bacia do Paranoá, fixando seu limite populacional na população existente à época. E recomenda a organização do território do DF em três grupos de áreas passíveis de ocupação e/ou preservação, à saber: (1) área metropolitana, compreendida pela Bacia do Paranoá, circunscrita pela Estrada Parque do Contorno – EPCT ou DF-001<sup>14</sup>, que demarca sua área de proteção; (2) áreas urbanas das “Cidades-Satélites”, já existentes; e (3) Área Rural, que abrangia o resto do território.

<sup>14</sup>Atualmente essa pista é conhecida como “Pistão” na altura de Taguatinga e como DF 001 no restante do DF. As atuais cidades de Vicente Pires, Águas Claras, Guará, Candangolândia, Núcleo Bandeirante e Park Way faziam parte do “Cinturão Verde” que circundava o Plano Piloto.

Nessa época, na contramão do previsto devido intenso fluxo migratório nas primeiras décadas da cidade, já existiam as primeiras “cidades-satélites” criadas para abrigar os operários pioneiros e a população de invasões das imediações dos canteiros de obras do Plano Piloto. Essas primeiras cidades planejadas foram implantadas em três regiões do território (figura 4.17) (GDF, 2008):

- (i) Fora da Bacia do Paranoá, marcando um eixo de expansão sudoeste, numa região de Plano Elevado, com predominância de Latossolos e declividades inferiores a 10%, de muito alto potencial para urbanização e para recarga onde foram implantadas: Taguatinga em 1958, Gama em 1960 e Ceilândia em 1971.
- (ii) Na área nordeste, numa região de plano intermediário e inserido no sítio verde, selecionado pelo relatório Belcher, na estrada que levava para Planaltina, foi implantado em 1960 um núcleo urbano pensado à época para se tornar centro das áreas rurais ao nordeste e noroeste do território, Sobradinho;
- (iii) E dentro da Bacia do Paranoá, sítio castanho do relatório Belcher, mesmo antes da ocupação surgiram para abrigar os trabalhadores: em 1956 as cidades do Núcleo Bandeirante e Candangolândia, que eram para ser temporárias, em 1958 o Cruzeiro e em 1967 o Guará; além dessas surgem também as áreas de habitação unifamiliar de muita baixa densidade, pensadas como alternativa de moradia aos prédios do centro e como de menor impacto ao meio ambiente: no Lago Sul (1958), Park Way (1961) e Lago Norte (1974).

Além dessas, alguns núcleos informais da época não foram destituídos e hoje compõe núcleos urbanos consolidados. Esses núcleos são: o Paranoá (1957) que surgiu na época da construção da represa do Lago ao seu Leste, o São Sebastião (1958) que surgiu próximo à olarias já desativadas próximo ao atual Jardim Botânico, a Fercal (1961) que surgiu próxima à indústrias de cimento existentes até a presente data ao norte do território, o Varjão (1975), que surgiu em área desocupada próximo ao Lago Norte e a Estrutural (1975) que surgiu em área próxima ao lixão da cidade, devido a atividade dos catadores de Lixo. Essas áreas não planejadas em geral, se encontram em áreas de maior sensibilidade ambiental (figura 4.17).



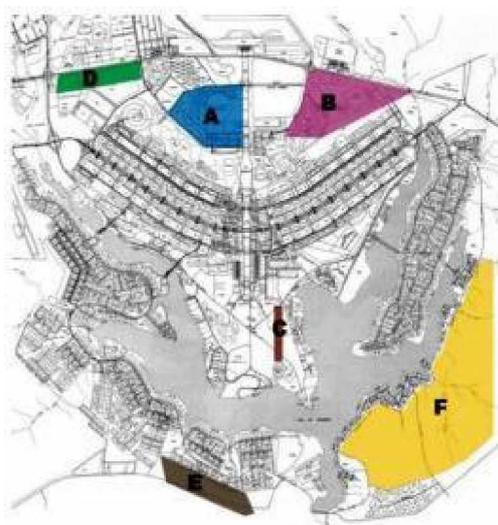
**Figura 4.18** - Zoneamento do PEOT 1977. Fonte: MANCINI, 2008.

Ainda, as cidades pré existentes goianas de Planaltina (do eixo nordeste) e Brazlândia (eixo oeste) foram incorporadas como “cidades-satélites” ao conjunto urbanístico do Distrito Federal logo em sua criação, em 1955 (GDF, 2008). Mesmo não tendo seu início planejado como as descritas acima, também se encontram em áreas de plano intermediário, que possuem alto

potencial para recarga e para urbanização (figura 4.17).

Em 1977, foi elaborado um estudo para definição de novas áreas de expansão, o PEOT – Plano Estrutural de Ordenamento Territorial (Decreto 4.049/78), com base em tendências de ocupação existentes à época, condições de infraestrutura de saneamento (abastecimento d’água e eliminação de esgotos), possibilidade de oferta de sistema de transporte de massa e condicionantes do meio físico. Indicando o eixo sudoeste (Taguatinga-Ceilândia-Gama) como o mais adequado para o crescimento urbano em termos de transporte, abastecimento de água e esgotamento (GDF, 2008).

As áreas propostas para localização dos futuros núcleos possuíam consonância com os estudos dos Relatórios Cruls e Belcher e fortaleciam a ocupação urbana do



**Figura 4.19** – Zoneamento do Brasília Revisitada.

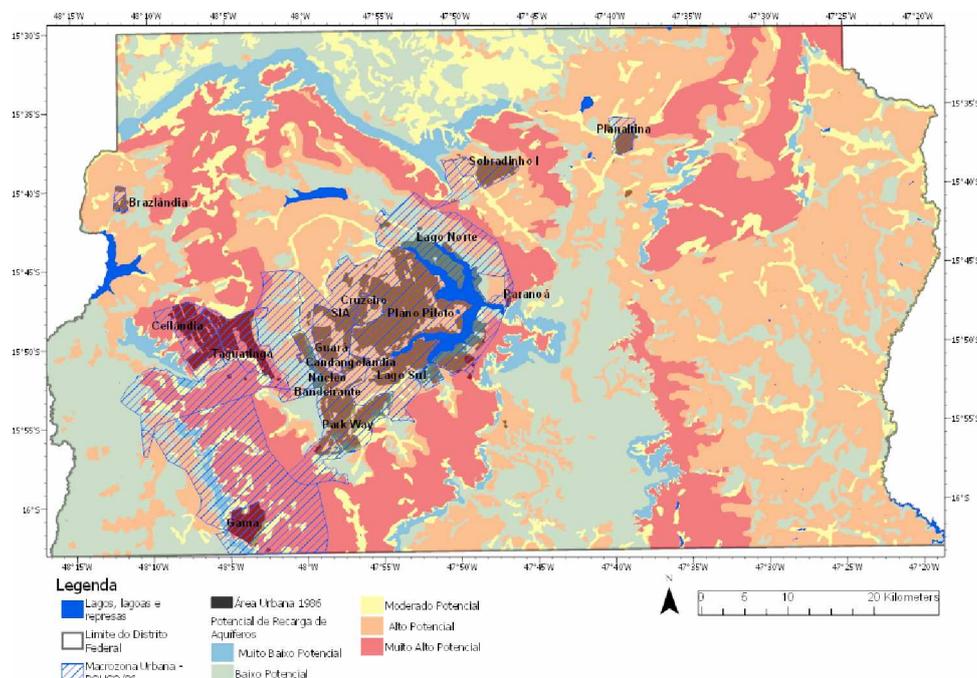
quadrante sudoeste em três zonas: área U, Núcleos A, B e C e núcleos D, E e F (figura 4.18). Todas as três zonas de expansão urbana planejadas pelo PEOT, foram posicionadas sobre o domínio do plano elevado, em áreas com predominância de Latossolos e declividades inferiores a 10%, com muito alto potencial de recarga dos aquíferos e de urbanização do solo.

Ainda, em 1987, contrariando o entendimento anterior de que a cobertura

vegetal remanescente da Bacia do Paranoá precisa ser preservada, o relatório Brasília Revisitada (Decreto Distrital nº 0.829/87), propôs o adensamento da Bacia, criando seis novas áreas habitacionais dentro de seu perímetro: (A) Bairro Oeste Sul; (B) Bairro Oeste Norte; (C) Quadras Vila Planalto; (D) Quadras da EPIA; (E) Asa Nova Sul; (F) Asa Nova Norte (figura 4.19) (GDF, 2008).

As áreas de expansão do PEOT/77 e do Brasília Revisitada/87, foram endossadas pelo Plano de Ocupação Territorial - POT, de 1986, Resolução do Cauma nº 31/86 e pelo Plano de Uso e Ocupação do Solo – POUZO, homologado em 1990 pelo Decreto nº 12.898/1990. O macrozoneamento do POUZO instituiu as seguintes zonas: ZUR – Zonas Urbanas; ZEU – Zonas de Expansão urbana; ZDM – Zonas de destinação mista; ZOR – Zonas de Ocupação Restrita; ZIA – Zonas de Interesse Ambiental; e ZRU – Zonas Rurais.

A sobreposição das zonas urbanas definidas para o território Distrito Federal no POUZO/1986-1990, com os potenciais de recarga e áreas urbanizadas à época, mostram que 71,86% da macrozona urbana definida ainda não estava urbanizada. E que 69,20% dessa área ainda não urbanizada estava sobreposta a áreas de alto e muito alto potencial de recarga<sup>15</sup> (figura 4.20).



**Figura 4.20** – Mapa da sobreposição da Macrozona urbana do POUZO/1986 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 1986. Própria autoria, 2018. Dados do ZEE/DF e Siturb.

<sup>15</sup> Ver mais detalhes no apêndice A – análise das macrozonas urbanas.

Já nessa época, as propostas de expansão do POT/77 e Brasília Revisitada/87, retificadas pelo PEOT/86 e POUSO/90, fundamentaram o surgimento de vários núcleos urbanos no eixo de expansão sudoeste: Samambaia (1985), Santa Maria (1991), Recanto das Emas (1993) e Riacho Fundo (1990) (GDF, 2008). O modelo de ocupação desses núcleos foi baseado em uma alta taxa de ocupação horizontal, com predomínio de habitações unifamiliares, separadas por grandes extensões de áreas verdes uma das outras e também da área do Plano Piloto.

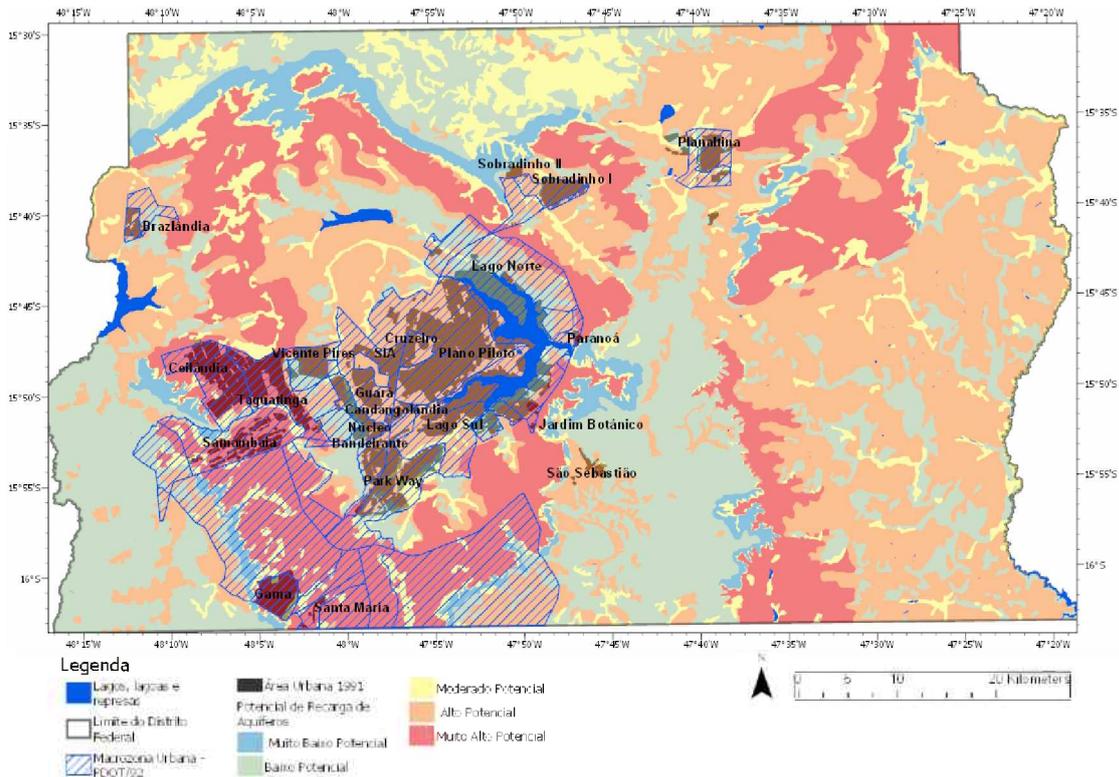
A partir do fim dos anos 1980, verifica-se o início de um segundo momento da ocupação urbana do Distrito Federal marcado por um predomínio de loteamentos informais unifamiliares, por populações de variadas faixas de renda, seguido por um planejamento urbano que apoia os eixos de expansão marcados por esses loteamentos em quadrantes fora dos anteriormente marcados, tendo em vista a necessidade de otimização dos investimentos de infraestrutura e menor grau de restrições ambientais.

As novas áreas se expandiram principalmente no quadrante leste, na Bacia do São Bartolomeu, onde já existiam as áreas informais do Paranoá e São Sebastião; e nordeste, em direção a Sobradinho e Planaltina; e nas áreas intersticiais entre Plano Piloto e Taguatinga, definidas nos planos anteriores como áreas de chácaras e proteção ambiental, como Vicente Pires e Arniqueiras (figura 4.21) (GDF, 2008).

O primeiro Plano Diretor de Ordenamento Territorial – PDOT de 1992, aprovado pela Lei nº 353/1992, consolidou as diretrizes de ocupação firmadas pelos planos anteriores, adaptando seu formato as novas exigências determinadas com a promulgação da Constituição Federal de 1988. Além dessas zonas o plano cria uma zona de expansão na região sul do território a leste de Santa Maria, mas se omite ainda diante da crescente irregularidade fundiária se expandindo pelo território. A sobreposição das zonas urbanas definidas pelo PDOT/92 com os potenciais de recarga e áreas urbanizadas à época, mostram um aumento das zonas demarcadas como urbanizáveis sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga. Da macrozona urbana definida pelo plano, 74,08% ainda não estava urbanizada em 1992, sendo que 73,47% dessa área disponível à urbanização estava sobreposta a áreas de alto e muito alto potencial de recarga<sup>16</sup> (figura 4.21).

---

<sup>16</sup> Ver mais detalhes no apêndice A – análise das macrozonas urbanas.



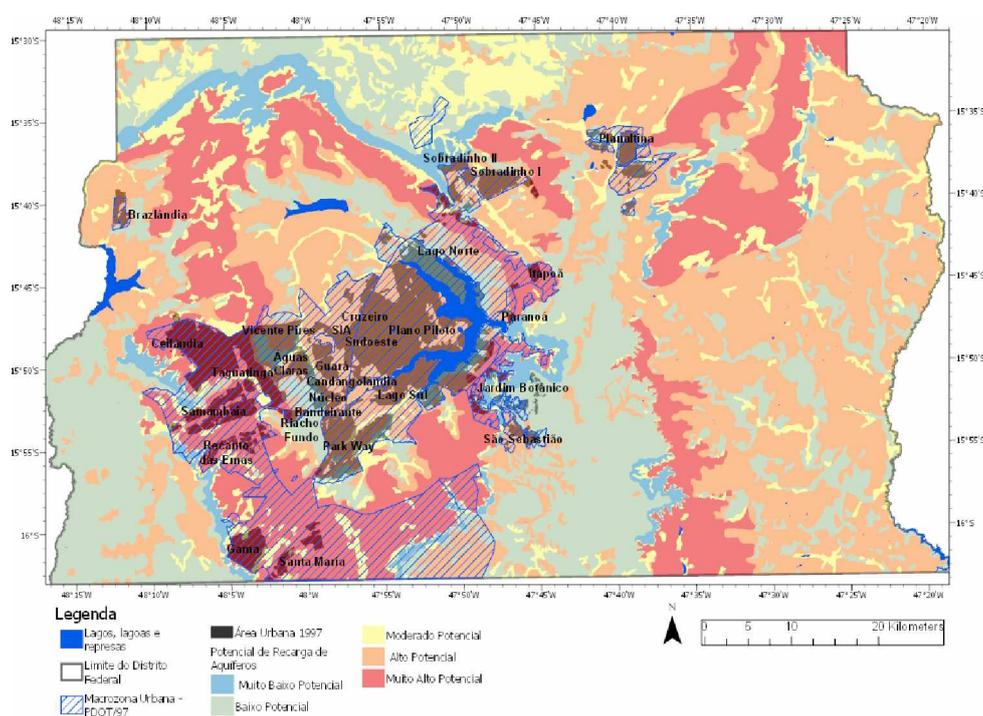
**Figura 4.21** – Mapa da sobreposição da Macrozona urbana do PDOT/1992 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 1991. Própria autoria, 2018. Dados de ZEE/DF e Siturb.

Do início dessa década são ainda as decisões de criação dos núcleos urbanos: do Sudoeste e Octogonal (1993) na Bacia do Paranoá e de Águas Claras (1997) e Riacho Fundo II (1994) na zona de expansão sudoeste. Assim como, a situação dos parcelamentos irregulares já estava latente, sendo que entre 1985 e 1995, foram contabilizados 529 novos parcelamentos irregulares em terras públicas griladas ou em terras particulares, especialmente na APA do rio São Bartolomeu (GDF, 2008).

Posteriormente, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial – PDOT/97, aprovado pela Lei Complementar nº 17/1997 continua a ratificar o eixo sudoeste como de ocupação prioritária. Entretanto, também são oficialmente reconhecidos os vetores de crescimento norte e leste, devido as pressões latentes das ocupações irregulares. O reconhecimento da área dos loteamentos informais e demarcação de área de monitoramento, acabou tendo um efeito contrário ao desejado e influenciando ainda mais o crescimento para essas regiões. Uma consequência dessa época é a ocupação do Itapoã e todo o conjunto de condomínio irregulares adjacentes e expansão irregular da cidade do Paranoá e de toda a área do Taquari, todos na bacia do Paranoá.

O zoneamento do PDOT/97 se divide em: Zona Urbana Consolidada; Zona Urbana de Uso Controlado (na área de maior incidência de parcelamentos informais); Zona Urbana de Dinamização (sob o eixo sudoeste do território); Zona Rural de Dinamização; Zona Rural de Uso Controlado; e Zona Rural de Uso Diversificado. Nesse plano, houve novamente um aumento da macrozona urbana principalmente devido a estratégia de abarcar as áreas informais. Com a expansão de áreas urbanizadas, o percentual de áreas a serem urbanizadas dentro da macrozona urbana passou para 63,30%, da qual 75,48% estava sobreposta a áreas de alto e muito alto potencial de recarga<sup>17</sup> (figura 4.22).

Após o PDOT/97 observou-se o aumento da ocupação extensiva do solo urbano nos vazios intersticiais (Arniqueiras e Vicente Pires) e em áreas de proteção ambiental com restrições físico-ambiental, como por exemplo a região do Sol Nascente, nas bordas de Ceilândia e condomínios na área de Ponte de Terra, próximo ao Gama. Além da continua expansão do processo de ocupação da região nordeste e da Bacia do São Bartolomeu, ao leste (figura 4.22).



**Figura 4.22** – Mapa da sobreposição da Macrozona urbana do PDOT/1997 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 1997. Própria autoria, 2018. Dados de ZEE/DF e Siturb.

O PDOT/09, aprovada pela Lei Complementar nº 803/2009 e alterado pela Lei Complementar nº 854, de 15 de outubro de 2012 diminui pela primeira vez a macrozona

<sup>17</sup> Ver mais detalhes no apêndice A – análise das macrozonas urbanas.

urbana, procurando ajustá-la apenas às ocupações existentes. Acaba com a zona de monitoramento prioritário criada no PDOT de 1997 dado que não surtiu efeito positivo. Mas, por outro lado, expande ainda mais a zona urbana na direção do eixo Leste e modifica a áreas de expansão urbana determinada no PDOT de 1992 e 1997, deslocando-a para o oeste.

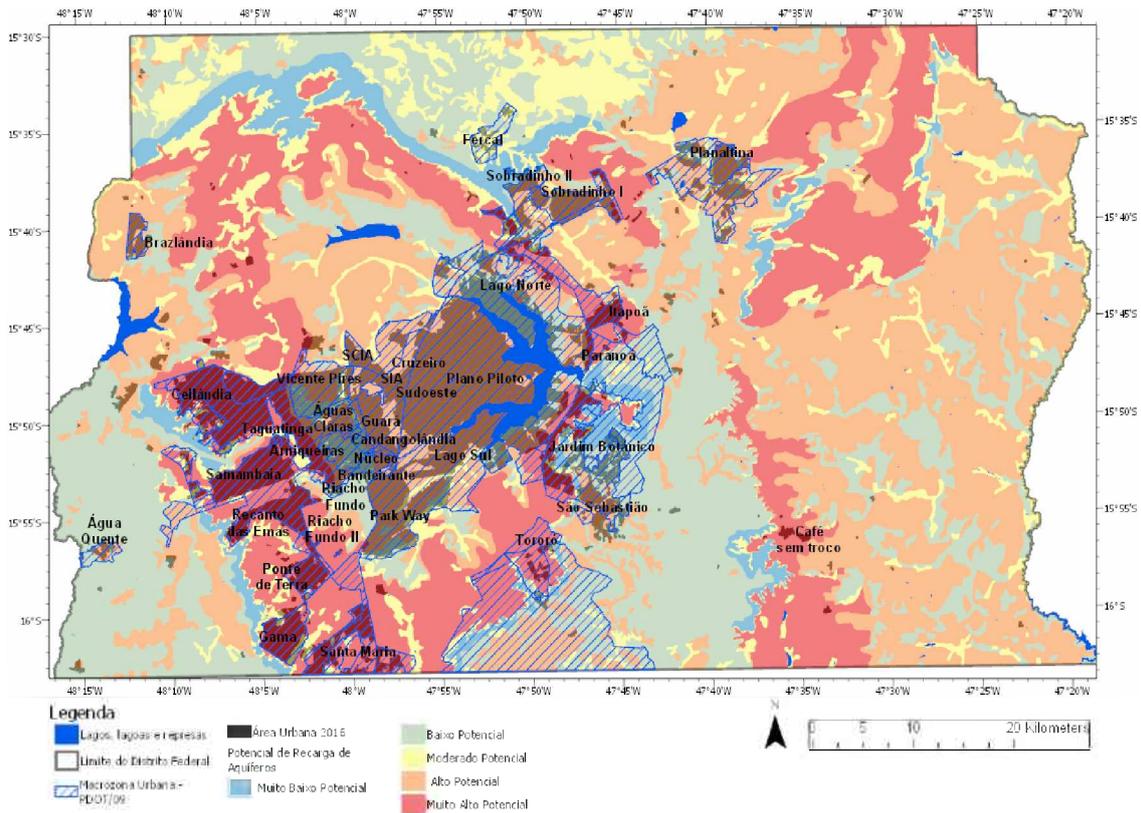
Após 2009, se inicia outro processo de adensamento da Bacia do Paranoá, com a implantação do Bairro Noroeste, planejado à época do Brasília Revisitada/87. Ainda, dessa época pode-se destacar as iniciativas de regularizar as ocupações já existentes em todos os quadrantes do DF e da continua expansão dos parcelamentos informais, à exemplo da denominada 26 de setembro (figura 4.23).

O PDOT 2009-2012 propõe a organização do território nas seguintes categorias: Zona Urbana do Conjunto Tombado; Zona Urbana de Uso Controlado I (destinada à restrições relativas a sensibilidade ambiental e proximidade do conjunto tombado); Zona Urbana de Uso Controlado II (destinada à compatibilização do uso urbano com a conservação dos recursos naturais, nas zonas informais, principalmente do eixo leste); Zona Urbana Consolidada; Zona Urbana de Expansão e Qualificação (destinada ao planejamento e ordenamento de futuras ocupações); Zona de Contenção Urbana (destinada a criação de espaços de amortecimento entre o uso urbano e rural); Zona Rural de Uso Diversificado; Zona Rural de Uso Controlado; e Macrozona de Proteção Integral(GDF, 2017).

A redução da macrozona urbana no PDOT/2009-2012 e deslocamento da zona de expansão do quadrante sul, teve um impacto muito positivo sobre a redução do total de zonas de expansão urbana sobrepostos a áreas de alto e muito alto potencial de recarga (foi reduzido 17.085,84ha). À época do PDOT/2009-2012, a área não urbanizada correspondia a 52,66% do total da macrozona. Com o aumento das áreas urbanizadas até 2016, essa área passou a corresponder a 49,83% da macrozona, do qual 58,26% (18.097,43ha) estavam sobrepostas a áreas de alto e muito alto potencial<sup>18</sup> (figura 4.23).

---

<sup>18</sup> Ver mais detalhes no apêndice A – análise das macrozonas urbanas.



**Figura 4.4** – Mapa da sobreposição da Macrozona urbana do PDOT/2009-2012 aos potenciais de recarga dos aquíferos e a área urbanizada em 2016. Própria autoria, 2018. Dados de ZEE/DF e Siturb.

Apesar de alguns dos Planos citados apontarem, no âmbito do discurso, a necessidade de limitar a ocupação urbana em áreas de recarga dos aquíferos no território, essa proposição não aconteceu de forma objetiva, pois a espacialização do processo da recarga nunca foi realizada, no âmbito dos planos, para subsidiar a tomada de decisão sobre que área definir como de expansão urbana.

O documento técnico do PDOT/2009, que revisa os planos de ordenamento do território anteriores, aponta de forma taxativa que *`apesar de controlar a impermeabilização do solo, de modo a manter a capacidade de recarga dos aquíferos, ser objetivo de vários planos, não há a integração entre os estudos hidrogeológicos e controle da expansão sobre áreas de recarga`* (GDF, 2008).

As altas taxas de urbanização e definição de zonas de expansão sobre essas áreas se deve as semelhanças dos fatores do meio físico entre as áreas propícias à recarga e a urbanização, o que dificulta a não ocupação dessas áreas. Sendo necessário, então, estratégias de ocupação do solo urbano de menor impacto à recarga, como as revisadas no capítulo 3 dessa pesquisa.

O desafio se coloca de forma ampla, pois somada à ocupação formal onde se poderia prever estratégias de baixo impacto, existe ainda uma ampla expansão da ocupação informal e desordena do território, que também ocupa áreas frágeis quanto a manutenção dessa função ecossistêmica, e onde implementar essas estratégias se torna mais desafiador.

## Síntese do capítulo

No Distrito Federal as águas subterrâneas têm importante função estratégica devido à falta de conformações naturais de retenção de águas superficiais e pelo clima composto de um período chuvoso e um período seco. Entretanto, sua redução já pode ser notada em várias regiões que utilizam esse recurso para abastecimento doméstico, como Brazlândia, Sobradinho e Sobradinho II, Planaltina, Fercal e São Sebastião. Estima-se que as mudanças da cobertura do solo nas zonas de recarga do Distrito Federal são a principal causa dessa depleção do nível freático.

Pela comparação dos fatores do meio físico intervenientes no processo de recarga e ocupação urbana do Distrito Federal percebe-se que as áreas propícias a urbanização e a recarga dos aquíferos ocorrem em áreas muito semelhantes do território (tabela 4.9).

**Tabela 4.9** – Características do meio físico do Distrito Federal relacionadas com o maior potencial de recarga dos aquíferos e com uma maior aptidão a ocupação urbana

	<b>Recarga de aquíferos</b>	<b>Ocupação Urbana</b>
<b>Geomorfologia</b>	As maiores altitudes relativas ocorrem nos: planos elevados, rebordos e planos intermediários As menores declividades ocorrem nos: planos elevados e planos intermediários	As menores declividades ocorrem nos: planos elevados e planos intermediários
<b>Pedologia</b>	Os solos com maior condutividade hidráulica e espessura são: latossolos vermelho e vermelho-amarelo	Os solos conjuntamente mais coesos, com alta resistência a cargas, compactos e permeáveis são: latossolos vermelho e vermelho-amarelo
<b>Clima</b>	A altura das chuvas é considerável (variando entre 1.200 e 1500mm/ano) e bem distribuída no território. As chuvas se concentram em quatro meses do ano, com influência sobre a umidade do solo anterior a precipitação	O Clima é ameno em todo o território A disponibilidade hídrica no território não é abundante.

A construção dos mapas de áreas propícias à recarga e a urbanização confirmam que todas as áreas de muito alto potencial de urbanização, que ocupam 55,79% do

território, são também áreas de alto e muito alto potencial de recarga, que ocupam 59,45% do território. O que demonstra a importância de considerar a variável da recarga no planejamento urbano.

A breve história do processo de ocupação urbana do território do Distrito Federal (tabela 4.10) mostra que, apesar de Brasília ter nascido sob o signo do planejamento baseado em estudos de características do meio físico, o alerta desses estudos quanto à necessidade de conhecer e proteger a função de recarga dos aquíferos não foi levado em consideração na prática. Uma vez que, a ocupação do território, planejada e espontânea ocorreu majoritariamente sobre essas áreas. De modo que, em 2016, além das áreas já urbanizadas já majoritariamente sobre áreas de recarga, 58,26% (18.097,43ha) das áreas ainda não urbanizadas da macrozona urbana encontram-se sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga, sem que sejam designadas estratégias de ocupação de menor impacto à recarga.

**Tabela 4.10** – Fases de planejamento da ocupação e surgimento dos núcleos urbanos do território do Distrito Federal.

<b>Fases de Planejamento da Ocupação do território</b>	<b>Diretrizes de ocupação</b>
<b>Primeira Fase:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relatório Cruls (1895)</li> <li>• Relatório Belcher (1955)</li> <li>• Projeto urbanístico de Lúcio Costa (1957)</li> <li>• Planidro (1970)</li> </ul>	Com base em condicionantes do meio físico foi selecionada área que abrange principalmente a Bacia do Paranoá como ponto de ocupação inicial do território, sendo ressaltada a importância de preservação da cobertura vegetal da bacia devido a questões de disponibilidade hídrica
<b>Segunda Fase:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• PEOT (1977)</li> <li>• Brasília revisitada (1987)</li> <li>• POT (1985)</li> <li>• Pouso (1986-1990)</li> <li>• PDOT (1992)</li> </ul>	Foram estabelecidas áreas de expansão no eixo sudoeste com base em condições de infraestrutura e do meio físico. E determinadas áreas de adensamento dentro da Bacia do Paranoá.
<b>PDOT (1992)</b>	São mantidas as mesmas definições dos planos anteriores, acrescida de uma zonada de expansão na região sul do território a direita de Santa Maria. Ainda não são reconhecidos os eixos de informalidade que crescem nos quadrantes nordeste e leste.
<b>PDOT (1997)</b>	Mantém as diretrizes do PDOT/92, incluindo os eixos norte e leste como zonas urbanas de uso controlado e monitoramento prioritário
<b>PDOT (2009-2012)</b>	Reduz a macrozona urbana, procurando aproximar seu limite aos limites das áreas ocupadas, altera a zona expansão definida no PDOT/92 e aumenta a zona urbana em direção ao eixo leste.

## **CAPÍTULO 05**

### **Impactos das tipologias de ocupação urbana sobre as áreas de recarga dos aquíferos: estudo da Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá no Distrito Federal**

Os conceitos estabelecidos no capítulo 3 desta pesquisa demonstram que as mudanças no regime hidrológico, trazidas pela antropização do meio ambiente, se dão principalmente devida mudanças no uso e cobertura do solo. À vista disso o presente capítulo visa identificar os padrões de alterações da cobertura do solo no território do Distrito Federal, com ênfase no impacto do processo de alteração da cobertura do solo derivado da urbanização.

Para isso o capítulo divide a análise em duas escalas: (1) uma analisa a mudança da cobertura do solo, no âmbito de todo o Distrito Federal, para compreender de forma mais abrangente os impactos das decisões de planejamento discutidas no capítulo anterior sobre as áreas de recarga; e (2) uma analisa as tipologias de ocupação urbana quanto ao seu impacto na recarga natural dos aquíferos com maior minúcia, no âmbito de uma Unidade Hidrográfica densamente urbanizada sobre áreas de recarga de aquíferos no Distrito Federal.

#### **1.1. Alterações na cobertura do solo sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga de aquíferos no Distrito Federal**

As áreas de alto e muito alto potencial de recarga de aquíferos do Distrito Federal, vem experimentando intensas transformações de cobertura, devido, sobretudo, um rápido processo de expansão de suas áreas urbanas e de consolidação das áreas destinadas ao uso agropecuário. E, como visto no capítulo 3, as alterações na cobertura do solo de forma geral reduzem as taxas de infiltração da água da chuva devido à redução da capacidade de entrada da água através da superfície do solo e redução da permeabilidade de suas primeiras camadas. Essas alterações são causadas pela: (i) redução da cobertura vegetal arbórea, que a partir de sua estrutura radicular e processos bioquímicos auxiliam a manter a porosidade solo; (ii) compactação do solo, devido à

mecanização dos processos construtivos e de atividades cotidianas; e (iv) o selamento do solo, com coberturas que não permitem a entrada da água através de sua superfície.

Para compreender melhor a expansão e atual situação do processo de alteração das coberturas do solo no DF sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga serão analisadas nessa seção, por meio de uma revisão temporal de imagens do território, a mudança de três categorias de cobertura do solo: (i) áreas urbanizadas; (ii) cobertura vegetal nativa e reflorestada; e (iii) outras áreas, como as com ocupações agropecuárias, de mineração e de chácaras.

A importância de verificar a expansão de áreas urbanizadas sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga, se deve ao fato de que nessas áreas ocorrem amplamente todos os fatores supracitados relacionadas com a perda de recarga, podendo-se inferir que nessas áreas ocorre uma redução drástica da taxa de infiltração. Essa condição é associada à majoritária extensão das áreas urbanizadas, uma vez que os padrões normalmente adotados para implantação de empreendimentos urbanos, envolvem o desmatamento e aplainamento do solo, mesmo quando não é feito o amplo uso de superfícies impermeáveis posteriormente (ver figura 5.1).



**Figura 5.1** – Exemplos de manipulação do solo na implantação de empreendimentos habitacionais no Distrito Federal, imagens de 2016.

As áreas de vegetação nativa do Distrito Federal estão inseridas integralmente no domínio do bioma Cerrado, considerado o segundo maior bioma do País em área, e um dos 34 hotspots mundiais para a conservação da biodiversidade (MYERS et al., 2005). Assim como esse bioma é importante devido sua rica biodiversidade, ele também é importante para o equilíbrio da produção de água no território, tanto localmente no Distrito Federal, quanto em áreas que excedem seus limites, uma vez que a região do Cerrado é o berço de 10 das 12 regiões hidrográficas do Brasil (figura 4.28) (LIMA, 2011). À exemplo, um estudo feito por Oliveira et. al (2015) demonstra que as taxas de infiltração em áreas de cerrado (formação savânica), com 50 a 70% da área coberta por

indivíduos arbóreos de 5 a 8m de altura, pode chegar a taxa de 79% da chuva precipitada, dependendo do tipo de solo e condições anteriores de umidade.

Diante disso, foi classificado na análise as coberturas vegetais nativas do bioma cerrado, separadas em formação florestal, savânica e campestre, e coberturas vegetais reflorestadas, com o intuito de saber onde ainda ocorre vegetação nativa, assim como, solo não manipulado, com preservação das características naturais de suas primeiras camadas. Além das áreas reflorestadas, onde mesmo que o solo já tenha sido perturbado, é esperada que os indivíduos arbóreos auxiliem no processo de recuperação de sua permeabilidade, aumentando a infiltração natural, como visto no capítulo 3.

Além dessas áreas, outros usos não urbanos, como agropecuárias, mineração e chácaras de recreio, foram considerados na análise para que fosse possível verificar as alterações na cobertura do solo do território como um todo. Uma vez que os impactos específicos desses usos não foram considerados na pesquisa, que possui foco sobre o espaço urbano, essas áreas foram agrupadas e denominadas como ‘outros’.

Para realizar a análise das mudanças dessas três categorias de cobertura do solo, foram utilizados dados: do Sistema de Informações Territoriais e Urbanas do Distrito Federal – Siturb (áreas urbanizada dos anos 1964, 1975, 1986, 1991, 1997, 2004, 2009 e 2015); da Companhia de Planejamento do Distrito Federal – Codeplan (Cobertura vegetal nativa e reflorestada dos anos 1984, 1986, 1991, 1997, 2004, 2009, 2015 e 2016); da Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura – Unesco (Cobertura vegetal e urbana de 1953); e dados desenvolvidos pela autora (área urbanizada em 2016).



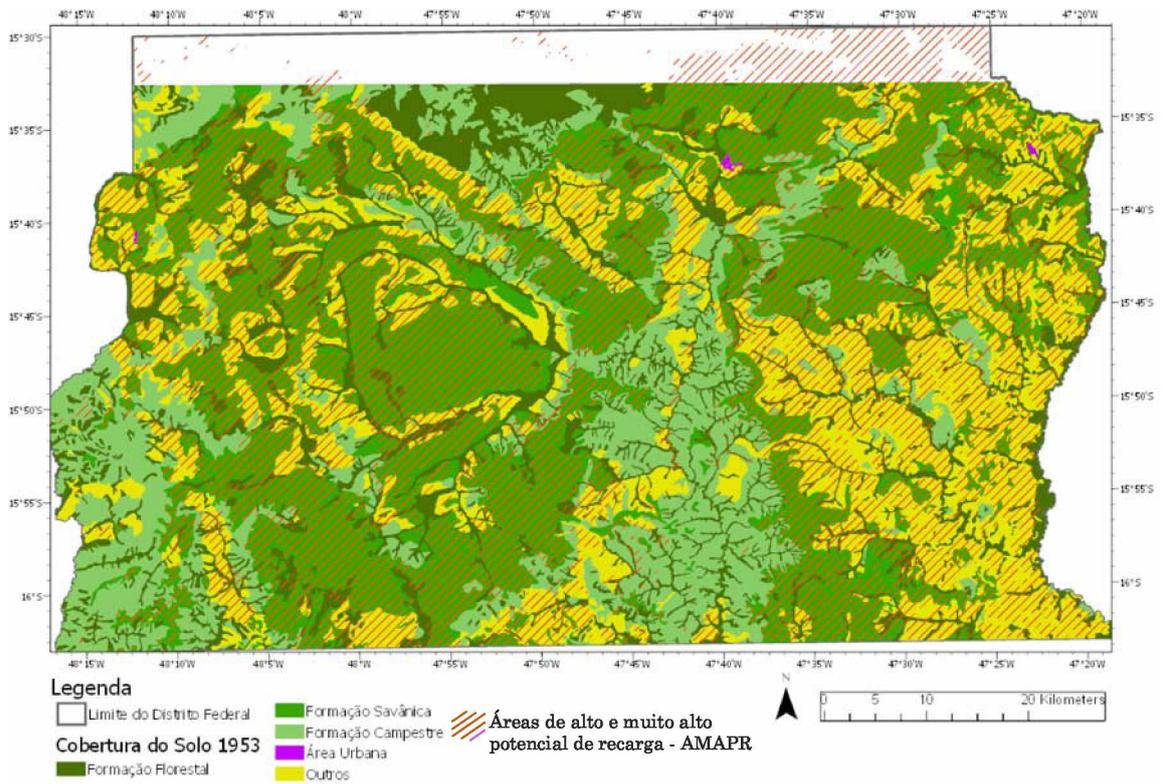
**Figura 5.2** – Relação entre áreas do Cerrado e as regiões hidrográficas brasileiras. Modificado de Lima, 2011

O mapeamento das coberturas do solo do ano de 1953 foram baseados no Relatório Belcher e na interpretação do sobrevoo da época feito pela USAF (United States Air Force), onde a cobertura do solo foi classificado em: (i) mata, (ii) cerrado, (iii) campo, (iv) áreas urbanas, (v) área agrícola (VERÍSSIMO, 2002). As informações

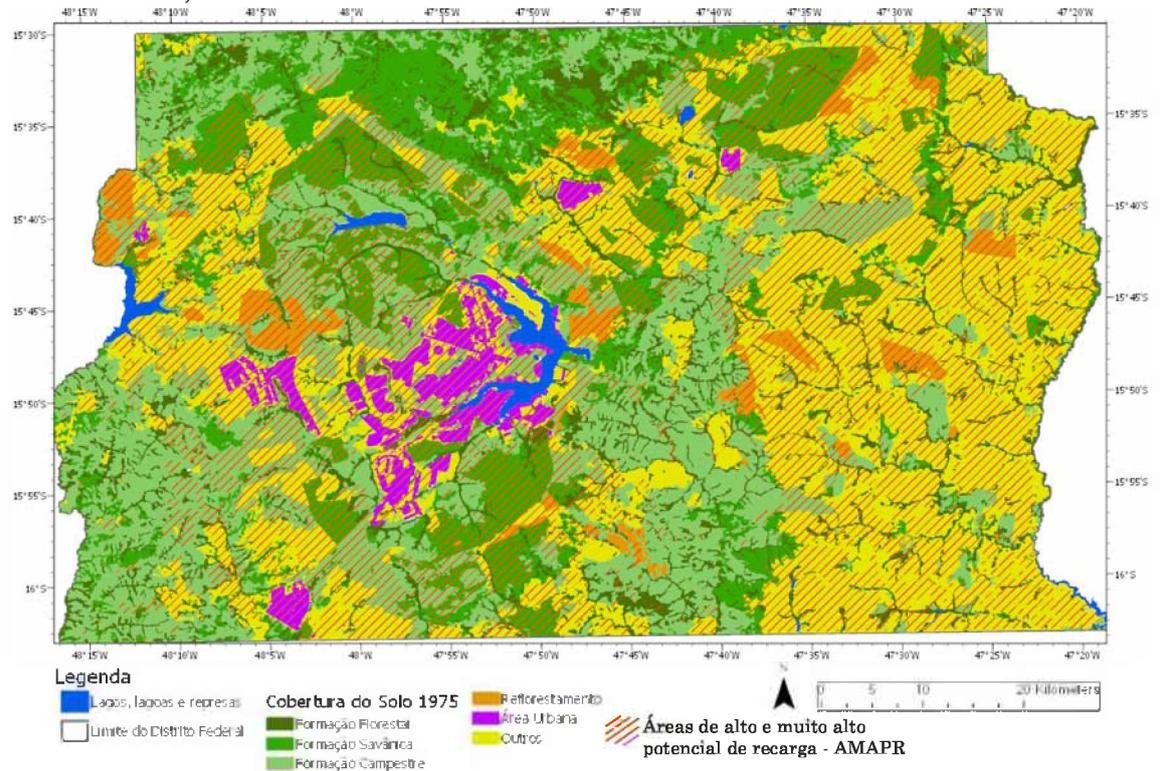
reflorestada dos demais anos foram extraídas das imagens do satélite Landsat 8 e Landsat 5, que possuem sensores infravermelho OLI e Thematic Mapper (TM), onde a cobertura foi classificada a partir dessas bandas em: (i) formação florestal, (ii) formação savânica, (iii) formação campestre, (iv) reflorestamento; (v) área construída e (vi) área agropastoril (NOVAES et al., 2016). A cobertura urbana dos anos de 1964, 1975, 1986, 1991, 1997, 2004, 2009 e 2015 foram retiradas do shape do Siturb “histórico das ocupações urbanas”, que foi construído manualmente com base em imagens de aerolevanteamento, onde as áreas com ocupação urbana foram delimitadas contemplando: lotes, vias, áreas comuns, áreas livres e áreas verdes, procurando utilizar o eixo das pistas que circundam esses elementos como delimitação, foi considerado nos levantamentos ocupações formais e informais.

O shape da área urbana de 2016 foi construído, também manualmente, pela autora, a partir de uma revisão do levantamento de 2015, último realizado pela SEGETH; e exclui da mancha urbana unidades de conservação de proteção integral, áreas de preservação permanente desocupadas, lagos, lagoas e represas. Uma vez que como já explicado em capítulos anteriores essas áreas possuem muito pouco espaço para intervenção antrópica e mesmo que circundadas por áreas urbanas, foram consideradas como cobertura vegetal nativa.

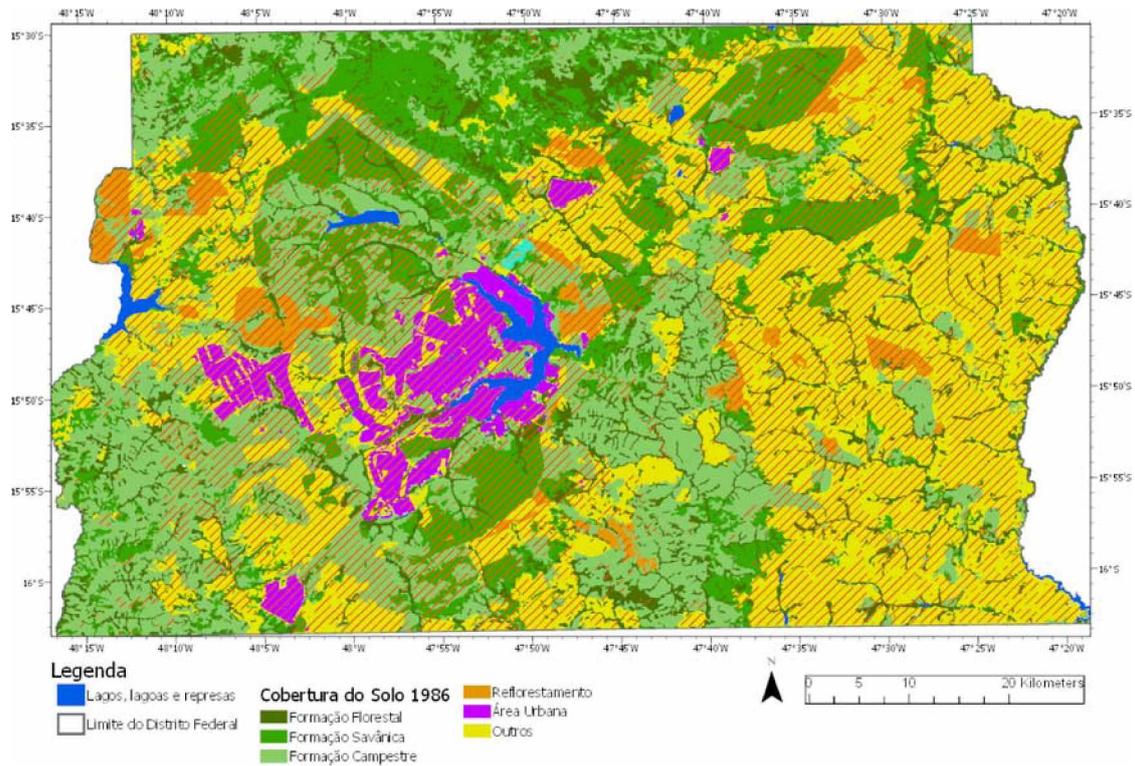
Esses dados vetorizados e georreferenciados, foram cruzados com o mapa de potencial de recarga de aquíferos construído no capítulo anterior desta pesquisa, capítulo 4, para montar cenários temporais de cobertura do solo no DF e analisar as mudanças dessa cobertura sobre os potenciais de recarga, por meio do software ArcGIS, para os anos de: 1953, 1975, 1986, 1991, 1997, 2009 e 2016 (ver figuras 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8).



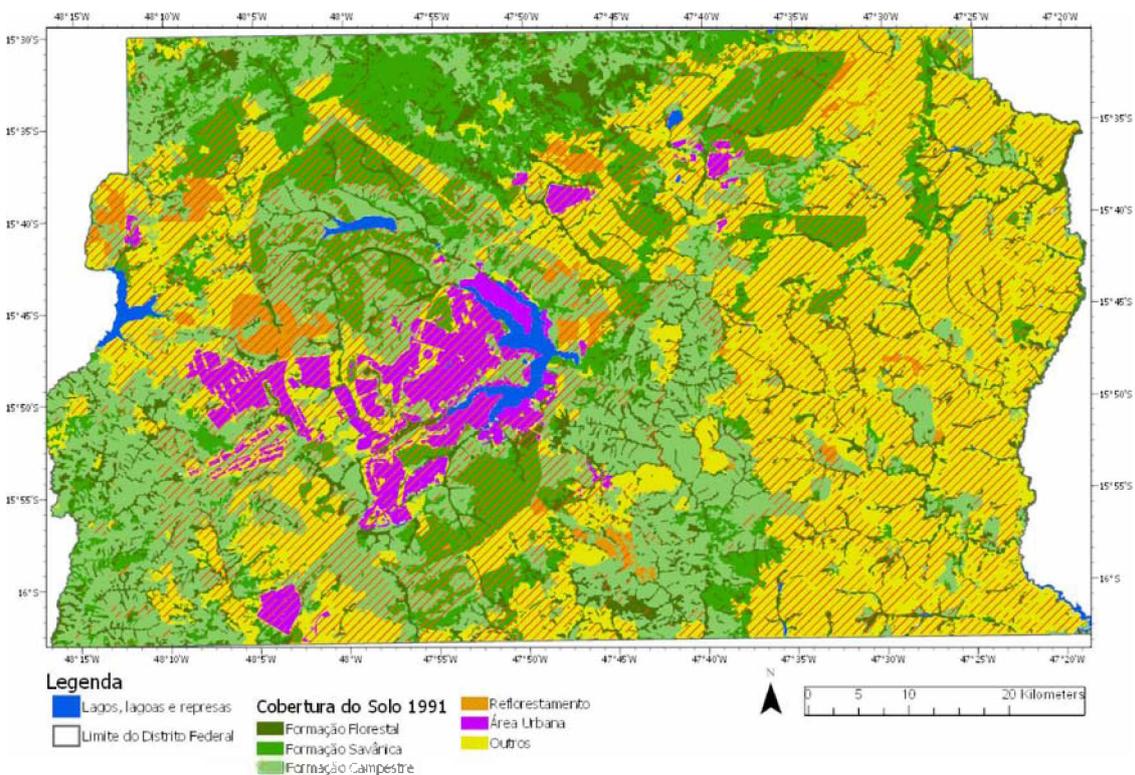
**Figura 5.3** – Mapa da cobertura do solo do Distrito Federal em 1953, classificado em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, com dados de VERÍSSIMO, 2002



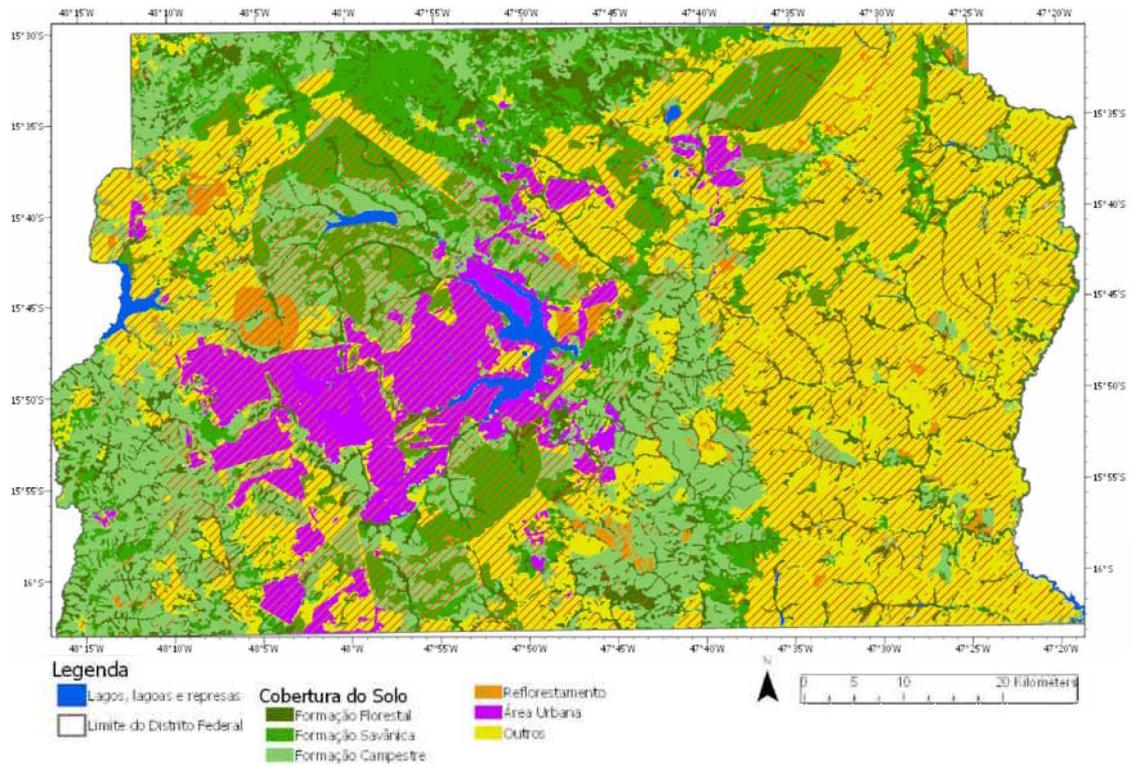
**Figura 5.4** – Mapa de Cobertura do solo do Distrito Federal em 1975, classificado em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, com dados do SITURB e NOVAES et al., 2016



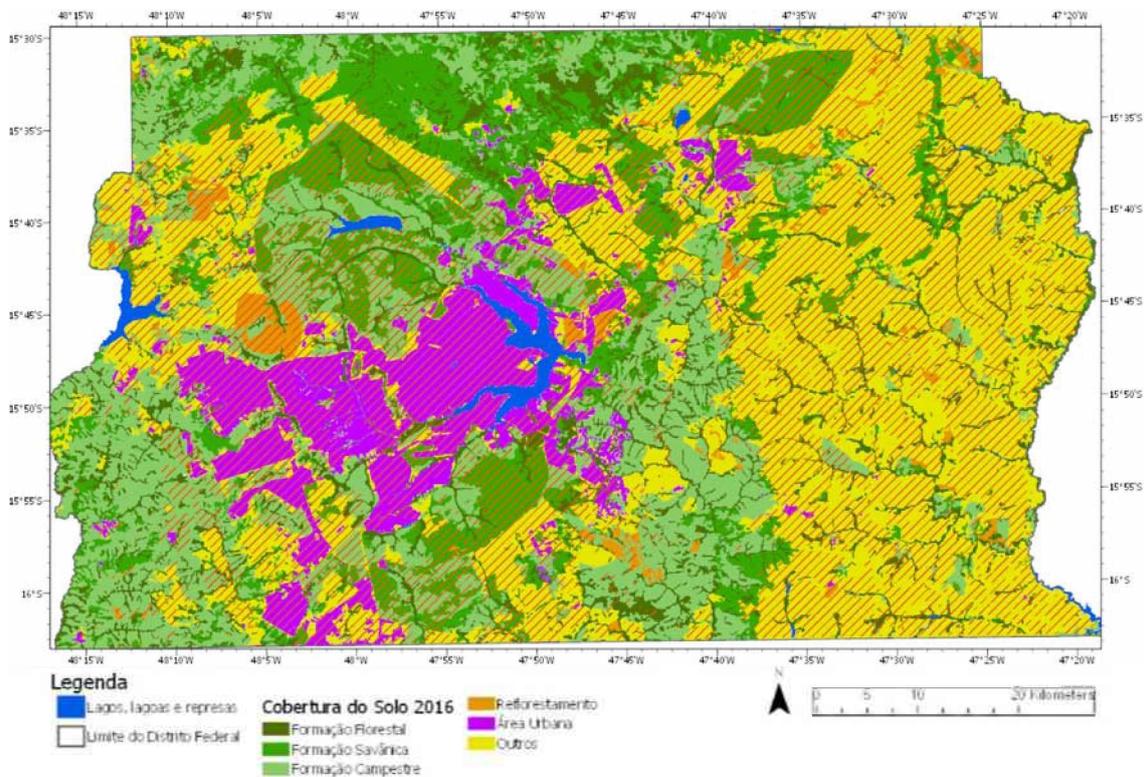
**Figura 5.5** – Mapa de Cobertura do solo do Distrito Federal em 1986, classificado em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, com dados do SITURB e NOVAES et al., 2016



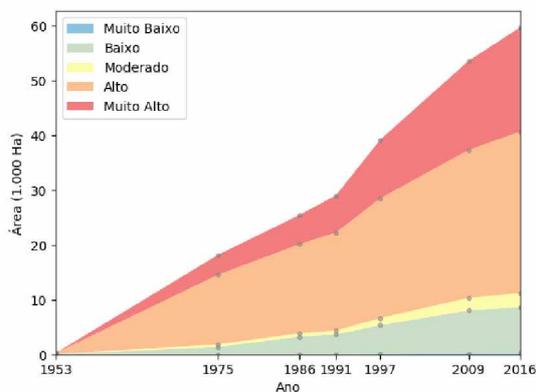
**Figura 5.6** – Mapa de Cobertura do solo do Distrito Federal em 1991, classificado em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, com dados do SITURB e NOVAES et al., 2016



**Figura 5.7** – Mapa de Cobertura do solo do Distrito Federal em 2009 classificado em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, com dados do SITURB e NOVAES et al., 2016



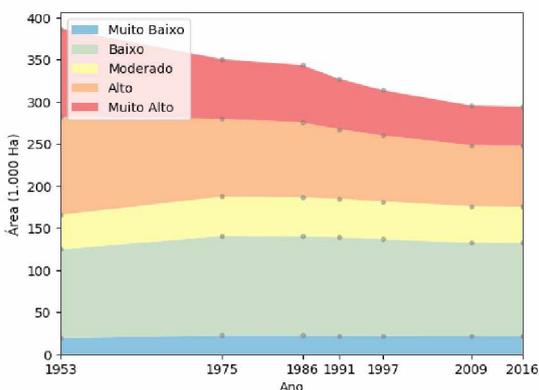
**Figura 5.8** – Mapa de Cobertura do solo do Distrito Federal em 2016 classificado em: área urbanizada, cobertura vegetal nativa (formações, florestal, savânica e campestre) e outros. Própria autoria, com dados do SITURB e NOVAES et al., 2016



**Figura 5.9** – Crescimento temporal das áreas urbanizadas em cada potencial de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018.

A partir do cruzamento desses dados percebe-se que em 1953 apenas 259ha do território estavam urbanizados, crescendo 230 vezes até 2016, chegando a 59.733,86ha. Da área urbanizada em 2016: 0,36% estavam sobre áreas de muito baixo potencial de recarga; 14,12% estavam sobre áreas de baixo potencial de recarga; 4,25% sobre áreas de moderado potencial de recarga; 49,36% sobre áreas de alto potencial

de recarga; e 31,88% sobre áreas de muito alto potencial de recarga; somando um total de **81,24% das áreas urbanizadas sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga<sup>19</sup>.**



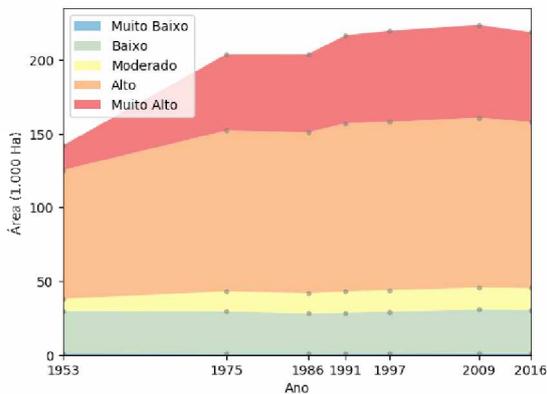
**Figura 5.10** - Redução temporal das áreas de cobertura vegetal nativa e reflorestada em cada potencial de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018.

Quantos às áreas com cobertura vegetal nativa ou reflorestada, entre os anos de 1953 e 2016 (figura 5.8), percebe-se que 114.326,68 hectares de vegetação nativa foi desmatada, entre os quais 58.222,59 hectares foram desmatados sobre áreas de muito alto potencial de recarga e 44.504,41 sobre áreas de alto potencial de recarga. **Ou seja, 90% de toda a cobertura vegetal nativa retirada do território, entre 1953 e**

**2016, foi sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga.** Das áreas de vegetação nativa e reflorestada remanescentes em 2016: 7,33% estavam sobre áreas de muito baixo potencial de recarga; 37,64% estavam sobre áreas de baixo potencial de recarga; 14,70% sobre áreas de moderado potencial de recarga; 24,51% sobre áreas de alto potencial de recarga; e 15,71% sobre áreas de muito alto potencial de recarga;

<sup>19</sup> Ver mais informações no apêndice B – Alterações na cobertura do solo do Distrito Federal

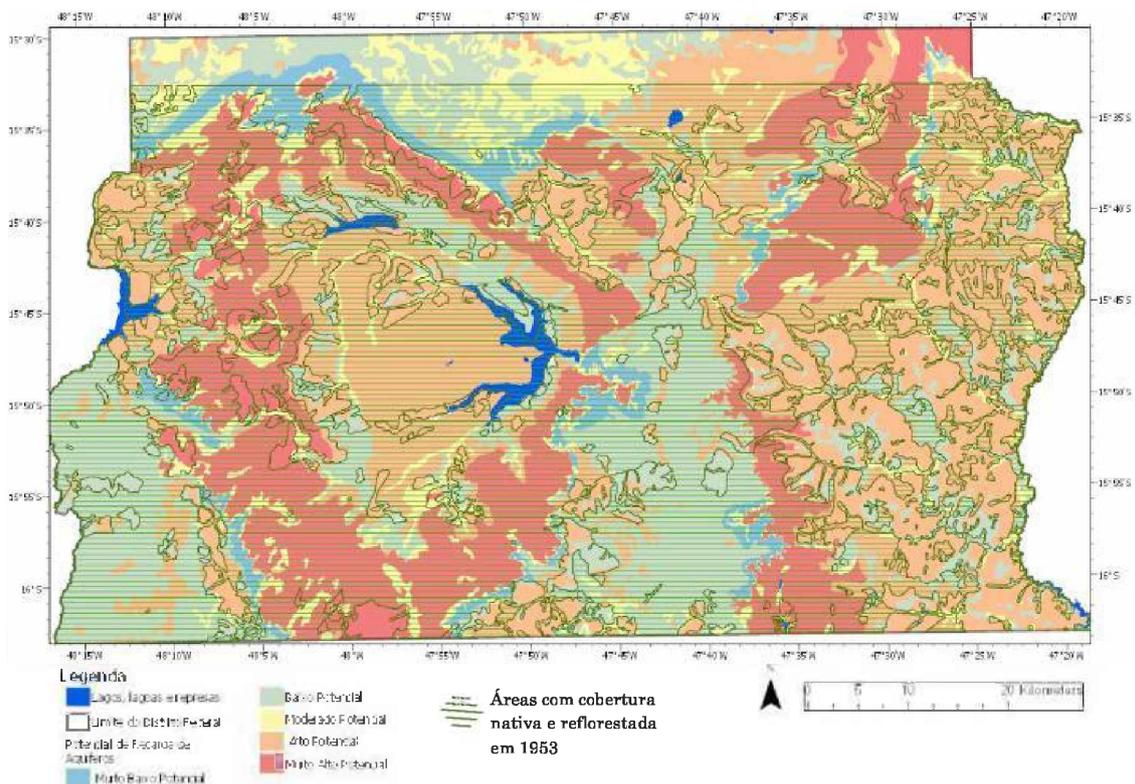
somando um total de 40,28% das áreas de vegetação nativa e reflorestada sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga.



**Figura 4.5**– Crescimento temporal de outras coberturas em cada potencial de recarga de aquíferos. Própria autoria, 2018.

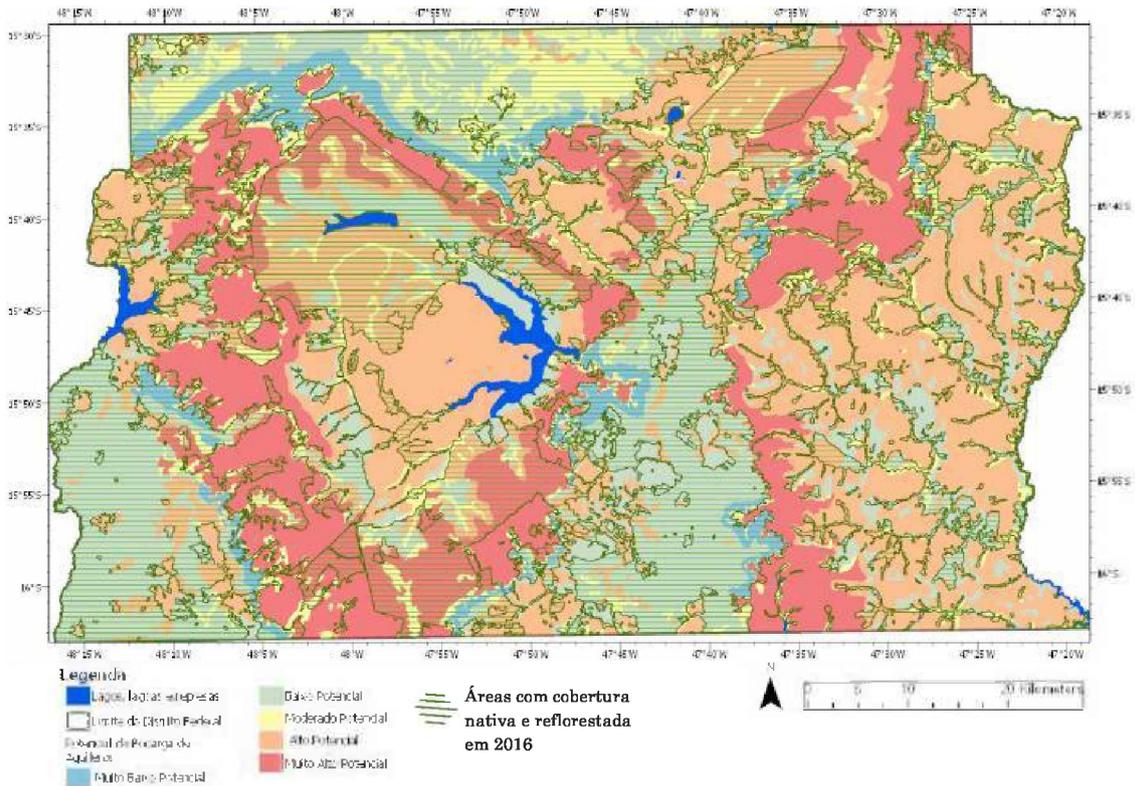
Em relação as “outras” coberturas do território, essas se expandiram entre 1953 a 2009, ocorrendo uma pequena redução, de cerca de 2%, de sua área entre 2009 e 2016. Em 1953, essas áreas se concentravam principalmente sobre áreas de baixo e alto potencial de recarga, sendo que em 2016 essas áreas passaram a se concentrar principalmente sobre áreas de alto e muito

alto potencial de recarga, estando 79,29% sobrepostas à essas áreas<sup>20</sup>.



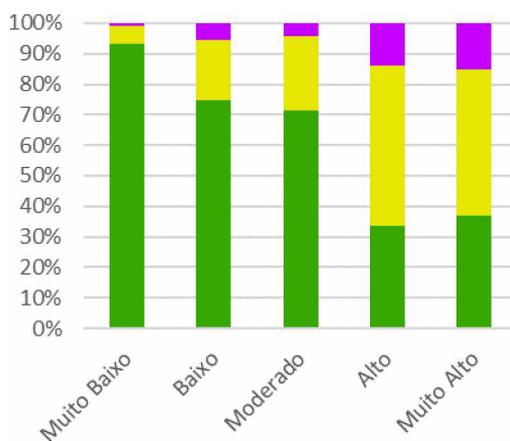
**Figura 5.12** – Mapa de sobreposição das áreas com cobertura vegetal nativa ou reflorestada em 1953 aos potenciais de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018. Dados de VERÍSSIMO, 2002.

<sup>20</sup> Ver mais informações no apêndice B – Alterações na cobertura do solo do Distrito Federal



**Figura 5.13** – Mapa de sobreposição das áreas com cobertura vegetal nativa ou reflorestada em 2016 aos potenciais de recarga dos aquíferos. Própria autoria, 2018. Dados de NOVAES, 2016.

Devida essas alterações de cobertura do solo, em 2016, **apenas 34,78% das áreas de alto e muito alto potencial de recarga dos aquíferos não haviam tido suas coberturas alteradas**, ou seja, ainda estavam cobertas por cobertura vegetal nativa ou reflorestada. Do total de áreas de alto e muito alto potencial alteradas, as áreas urbanas



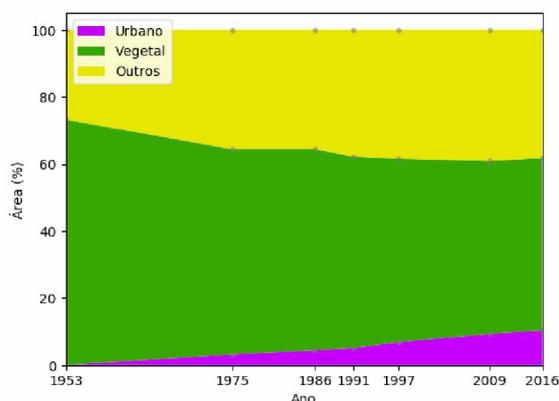
**Figura 5.14** – Coberturas do solo das áreas de diferentes potenciais de recarga dos aquíferos em 2016. Própria autoria, 2018.

representam 14,25% e “outras” áreas 50,97%<sup>21</sup>.

Entre 1953 e 2016, o período de análise do estudo, a cobertura do solo do Distrito Federal passou de uma composição de: 73,18% de cobertura vegetal nativa ou reflorestada, 0,04% de cobertura urbana e 26,77% de outras coberturas; para: 51,34% de cobertura vegetal nativa ou reflorestada, 10,43% de

<sup>21</sup> Idem.

cobertura urbana e 38,23% de outras coberturas. Nesses 63 anos 44,95% da área desmatada passou a ter uso urbano, enquanto 66,05% outros usos.



**Figura 5.6** – Mudança temporal na composição da cobertura do solo no Distrito Federal. Própria autoria, 2018.

Nesse período, o crescimento anual médio geométrico das “outras” coberturas foi de 0,67%, enquanto o da cobertura urbana de 9,01%. E como visto no capítulo anterior, 44,89% da macrozona urbana delimitada pelo PDOT/09-12 ainda não foi ocupada e 63,58% dessa área encontram-se sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga de aquíferos.

Caso essa área demarcada pelo PDOT/09-12 seja urbanizada e as “outras” coberturas não se expandam: (i) a área urbana praticamente dobraria de tamanho; (ii) mais 36.117,80ha de cobertura vegetal nativa e reflorestada seriam desmatadas; (iii) e mais 5,19% das áreas de alto e muito alto potencial de recarga teriam sua cobertura urbanizada, restando no total 29,53% das dessas áreas com cobertura vegetal nativa e reflorestada.

Isso demonstra que as áreas de alto e muito alto potencial de recarga já foram bastante alteradas desde a instituição do Distrito Federal; e que, embora a maior parte das áreas de alto e muito alto potencial de recarga estejam ocupadas atualmente por “outras” coberturas do solo, as áreas urbanizadas exercem ainda grande pressão sobre as áreas de alto e muito alto potencial de recarga remanescentes, uma vez que essa cobertura continua aumentando e “outras” coberturas começaram a diminuir.

No entanto, ainda, sabe-se pouco sobre o potencial impacto da área urbanizada sobre as áreas de alto e muito alto potencial de recarga, dado que a ocupação do solo urbano não ocorre de forma homogênea, não influenciando o regime hidrológico do mesmo modo. Cabe, então, entender melhor como se comportam as diferentes formas de ocupação urbana em relação a capacidade de infiltração para informar o planejamento e gestão urbana de modo a mitigar os impactos das áreas urbanizadas sobre essa função ecossistêmica.

## 1.2. Estudo da área urbanizada da Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá no Distrito Federal

Assim, para aprofundar a análise, se investigará em maior detalhe e menor escala uma região extensamente urbanizada sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga no Distrito Federal. Para isso o presente tópico se divide em três partes: (1) na primeira discute os critérios de escolha da Unidade Hidrográfica de estudo, com base na quantidade de área urbanizada sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga de aquíferos; (2) na segunda se discute os critérios de definição dos grupos de tipologias urbanas selecionada de acordo com sua densidade construtiva; e (3) na terceira, serão analisadas cada um dos grupos tipológicos quanto aos parâmetros urbanísticos com implicações sobre a infiltração natural da água da chuva, tendo em conta as condições de selagem, compactação e vegetação arbórea, identificadas no capítulo 3 da pesquisa como fatores de maior impacto sobre a infiltração.

### **1.2.1. Seleção da Unidade Hidrográfica de análise**

Com objetivo de identificar as relações entre as diferentes formas de ocupação do solo urbano e seus impactos sobre áreas de recarga de forma mais detalhada, se optou por proceder a análise por unidades hidrográficas.

Considerar as delimitações das Bacias Hidrográficas e suas sub unidades, as Unidades Hidrográficas, é importante para aproximação do planejamento territorial e gestão das águas, uma vez que essas delimitações representam áreas de captação natural da água de precipitação, que converge o escoamento, superficial e subterrâneo, por meio de várias rotas de drenagem para um único ponto de saída, de acordo com o relevo da região.

As UH do Distrito Federal já são adotadas como base territorial de planejamento e análise na Lei Orgânica do DF (Lei Orgânica nº23/1993), Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos – PGIRH (2012), e no ZEE-DF (2017). Entretanto ainda são pouco aplicadas na prática do planejamento e gestão urbana.

A seleção da UH que servirá como área de estudo foi feita a partir de uma sobreposição do mapa de potenciais de recarga de aquíferos e da área urbanizada em 2016, desenvolvidos pela autora dessa pesquisa no capítulo 4, e do limite das Unidades Hidrográficas do Distrito Federal, obtidos pelo Siturb, em ambiente de informações georreferenciadas por meio do software ArcGIS. Esse cruzamento permitiu verificar as Unidades Hidrográficas que possuem seu potencial de recarga natural dos aquíferos mais ou menos comprometido, devido a urbanização.

Como visto no capítulo 3, mesmo taxas muito baixas de selamento de uma Bacia Hidrográfica, percentuais que variam entorno de 10%, já começam a alterar grandemente seu regime hidrológico. No Distrito Federal, 12 das 41 UH existentes possuem mais de 10% de suas áreas urbanizadas, elas são: (1) Riacho Fundo (54,99%), que abrange os núcleos urbanos de Águas Claras, Vicente Pires, Riacho Fundo I e II, Guará, Núcleo Bandeirante, Candangolândia e Park Way; (2) Lago Paranoá (48,34%), que abrange os núcleos urbanos do Plano Piloto, Lago Sul e Norte, Sudoeste, Cruzeiro, Noroeste, Paranoá e Itapoã; (3) Rio Santa Maria (43,15%), que abrange o núcleo urbano de Santa Maria; (4) Rio Melchior (31,23%), que abrange os núcleos urbanos de Ceilândia, Taguatinga e Samambaia; (5) Rio Alagado (28,48%), que abrange os núcleos urbanos de Gama e Santa Maria; (6) Ribeirão Taboca (26,73%), que abrange o núcleo urbano do Jardim Botânico (7) Ribeirão do Gama (25,41%), que abrange o núcleo urbano do Park Way; (8) Ribeirão Papuda (23,72%), que abrange os núcleos urbanos de São Sebastião e Jardim Botânico; (9) Ribeirão Sobradinho (21,11%), que abrange os núcleos urbanos de Sobradinho I e II e Itapoã; (10) Ribeirão das Pedras (17,11%), que abrange os núcleos urbanos de Ceilândia e Taguatinga; (11) Ribeirão Ponte alta (16,15%), que abrange os núcleos urbanos do Gama, Ponte de Terra e Recanto das Emas; e (12) Ribeirão Saia Velha (11,45%), que abrange o núcleo urbano de Santa Maria<sup>22</sup>.

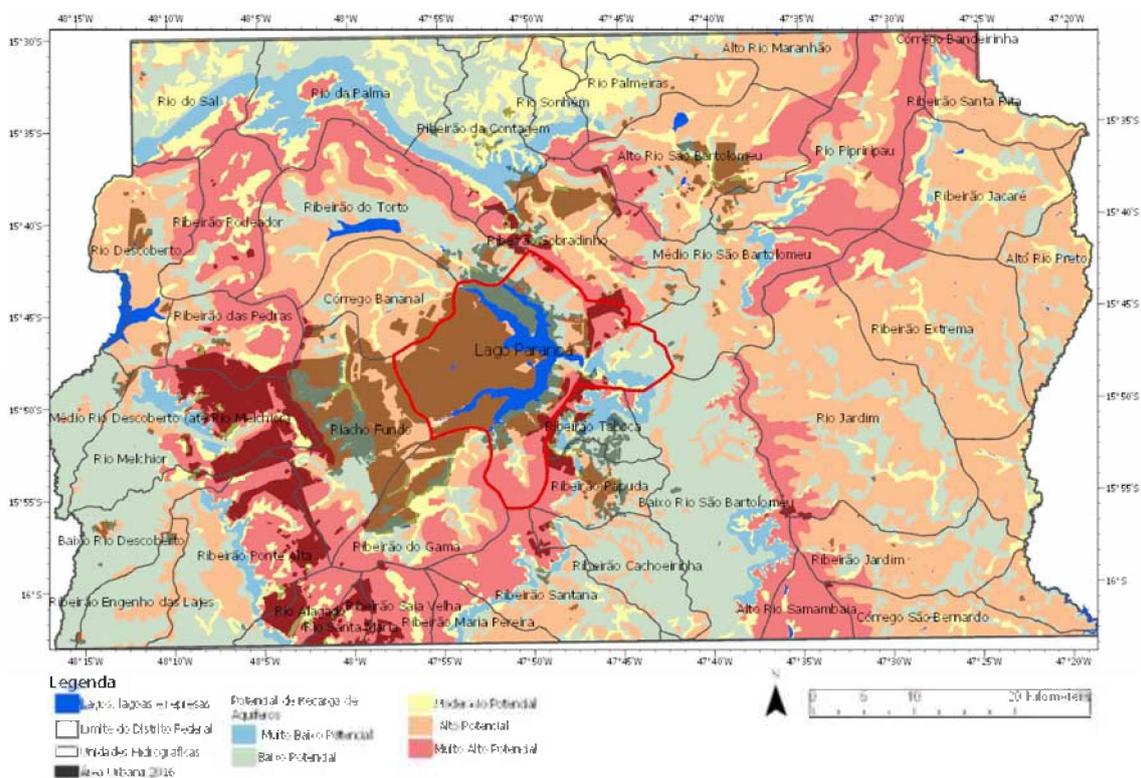
Em relação a extensão das áreas urbanizadas sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga, as 10 UH mais afetadas são: (1) Lago Paranoá (13.544,90ha); (2) Rio Melchior (8.560,06ha); (3) Riacho Fundo (6.105,05ha); (4) Ribeirão Ponte Alta (3.222,70ha); (5) Ribeirão do Gama (2.768,56ha); (6) Ribeirão Sobradinho (2.695,07ha); (7) Ribeirão das Pedras (1.649,84ha); (8) Rio Alagado (1.614,52ha); (9) Ribeirão Taboca (1.188,06ha); (10) Alto Rio São Bartolomeu (1.097,31ha).

As UH que estão simultaneamente densamente urbanizadas e com grande percentual dessa ocupação sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga apresentam um maior risco para perda de recarga natural dos aquíferos naquela região, o que pode levar a redução da quantidade de água disponível, redução da regulação das vazões dos corpos d'água superficiais durante os períodos secos e aumento do escoamento superficial. Com tal, é necessário ter especial atenção às repostas

---

<sup>22</sup> Ver mais informações no apêndice C – Seleção da Unidade Hidrográfica de análise

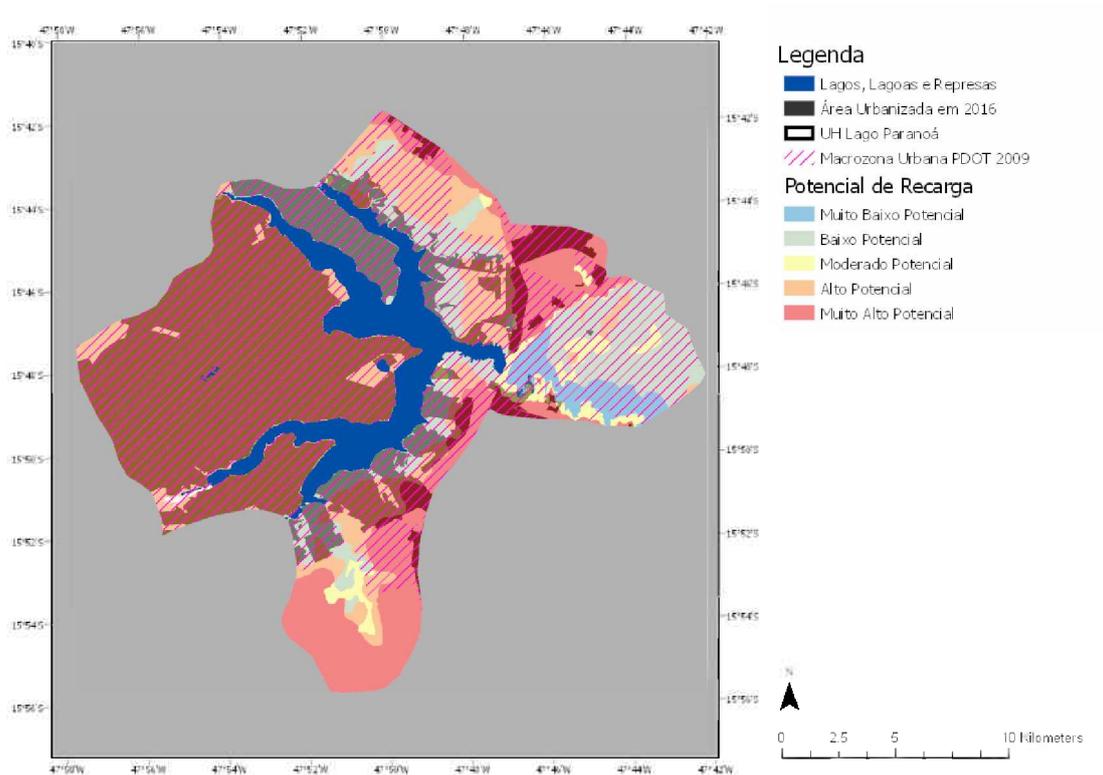
hidrológicas dos elementos configuracionais da ocupação urbana local, principalmente quanto a infiltração natural da água da chuva.



**Figura 5.16** – Mapa de sobreposição dos potenciais de recarga dos aquíferos, área urbanizada em 2016 e limites das Unidades Hidrográficas do Distrito Federal, com destaque da UH Lago Paranoá. Própria autoria, 2018.

Esses foram os fundamentos para a seleção da UH do Lago Paranoá como área de estudo, uma vez que 48,34% de sua área está urbanizada (16.208,64ha) e que 83,02% dessa área está sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga. Esse total representa que 62,90% do total das áreas de alto e muito alto potencial de recarga da subscia estão estavam urbanizadas em 2016.

Ainda 36,04% da macrozona urbana da Unidade Hidrográfica do Paranoa não foi urbanizada. Caso essa área seja urbanizada 7.457,67ha de vegetação nativa ou reflorestada serão desmatadas e 83,62% das áreas de alto e muito alto potencial de recarga da subscia passarão a estar urbanizadas.



**Figura 5.17** - Coberturas urbana, vegetal e outras da Unidade Hidrográfica Lago Paranoá em 2016. Própria autoria, 2018.

### 1.2.2. Tipologias urbanas de densidade construtiva homogênea

Como visto no capítulo 3, historicamente, a principal característica da ocupação urbana levada em consideração para gestão da água da chuva é o percentual de áreas impermeáveis observado a partir da densidade construtiva. Normalmente as ferramentas de análise do comportamento hidrológico, como o WetSpa, SWAT e SWMM, associam diferentes cenários urbanos, a partir de suas densidades construtivas com diferentes coeficientes de escoamento superficial (tabela 5.1).

**Tabela 5.1** – Valores de coeficiente da curva média de infiltração - CN em função da permeabilidade do solo e cenários de urbanização, observados a partir da densidade construtiva, em 5% de declividade. Fonte: GONÇALVEZ, 2012.

Cenários de urbanização	CN das classes hidrológicas de solo			
	A	B	C	D
Zonas comerciais com 85% de superfícies impermeáveis	89	92	94	95
Zonas industriais com 75% de superfícies impermeáveis	81	88	91	93
Zonas residenciais com 65% de superfícies impermeáveis	77	85	90	92
Zonas residenciais com 38% de superfícies impermeáveis	61	75	83	87
Zonas residenciais com 30% de superfícies impermeáveis	57	72	81	86

Zonas residenciais com 25% de superfícies impermeáveis	54	70	80	85
Zonas residenciais com 20% de superfícies impermeáveis	51	68	79	84
Zonas residenciais com 12% de superfícies impermeáveis	46	65	77	82

Fundamentado nesse entendimento, nessa primeira parte da análise, a área urbanizada da UH Lago Paranoá foi classificada em cinco zonas de densidade construtiva homogênea, ou seja, com graus de impermeabilização relativos a áreas construídas semelhantes. A partir desse critério, a área urbanizada da sub bacia foi classificada em cinco zonas: (1) zonas de muito alta densidade construtiva, acima de 80% de impermeabilização; (2) zonas de alta densidade construtiva, entre 60 e 80% de impermeabilização; (3) zonas de média densidade construtiva, entre 40 e 60% de impermeabilização; (4) zonas de baixa densidade construtiva, entre 20 e 40% de impermeabilização; e (5) zonas de muito baixa densidade Construtiva, abaixo de 20% de impermeabilização.

Para mais, foram considerados também nessa primeira caracterização da área urbanizada os elementos configuracionais, identificados no capítulo 3, e alguns de seus parâmetros urbanísticos relacionados com a infiltração da água, sendo esses: o sistema viário (percentual ocupado), as áreas públicas livres<sup>23</sup> (percentual ocupado) e os lotes (tamanho e taxa de ocupação). Esses parâmetros foram utilizados para identificar tipologias urbanas semelhantes dentro de cada zona de densidade construtiva homogênea. Nesse primeiro momento as tipologias e zonas urbanas foram identificadas a partir de análise visual de imagens de aerofotogrametria de 2016, obtidas por meio do banco de imagens do Siturb. Os resultados são apresentados a seguir:

---

<sup>23</sup> Entendida aqui como os espaços públicos não ocupados por construções ou sistema viário.

**(i) Zonas de muito alta densidade construtiva – acima de 80 % de impermeabilização**

Áreas de ocorrência:

Q. 900 Sul e Norte: S. Comercial, Bancário,  
Autarquias e Hoteleito Sul Cruzeiro Velho:  
e Norte:



Cruzeiro Novo:

SIA e SIG:

Vila Telebrasília, Vila Planalto,  
Paranoá e Itapoã:



**(ii) Zonas de alta densidade construtiva – 60 a 80 % de impermeabilização**

Áreas de ocorrência:

W3 Sul e Norte: Sudoeste econômico: Expansão Paranoá:



J. Botânico, Altiplano L., S. Dom Bosco,  
Cond.do Taquari e Itapoã:



**(iii) Zonas de média densidade construtiva - 40 a 60% de impermeabilização**

Áreas de ocorrência:

Asa Sul e Norte:

Sudoeste e Octogonal:

Lago Sul e Norte:



Cond. Itapoã e Paranoá:



**(iv) Zonas de baixa densidade construtiva – 20 a 40 % de impermeabilização**

Áreas de ocorrência:

Mansões Lago Sul e Norte:

Chác. Taquari e Cond. Vila Planalto:



**(v) Zonas de muito baixa densidade construtiva – abaixo de 20% de impermeabilização**

Áreas de ocorrência:

Embaixadas, Clubes, UnB, S.

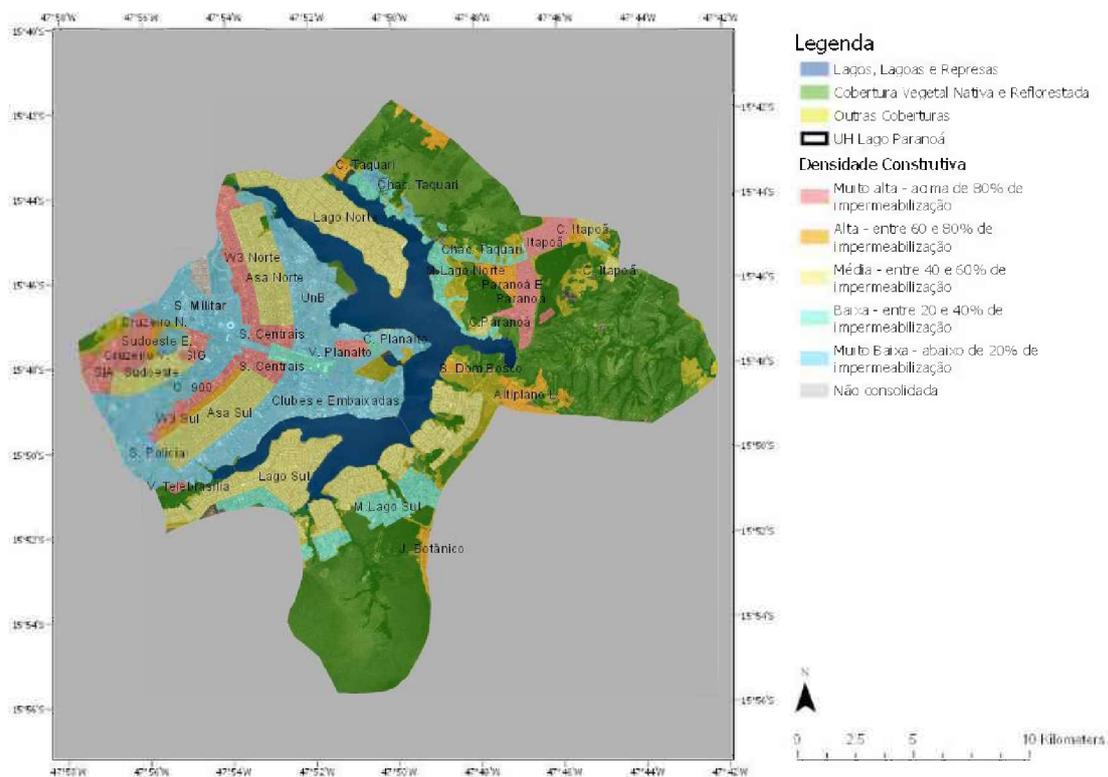
Policial, S. Militar, Esplanada, Chácaras Taquari:

Parques Sul e Norte:



Após categorizar as 5 zonas de densidade construtiva e suas 18 tipologias urbanas, essas áreas foram comparadas com as áreas de potenciais de recarga, desenvolvidas no capítulo 4. A partir desse cruzamento apreendeu-se que as duas zonas de maior extensão na UH Lago Paranoa são as de muita baixa e média densidade construtiva, que possuem respectivamente 5.645,46ha e 5.537,07ha, dos quais 98,25% e 64,62% se encontram sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga. As outras zonas de muito alta, baixa e alta densidade construtiva ocupam respectivamente 2.443,13ha, 1.6642,95ha e 903,24ha da subbacia, dos quais 98,46%, 69,67% e 80,49% estão sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga.

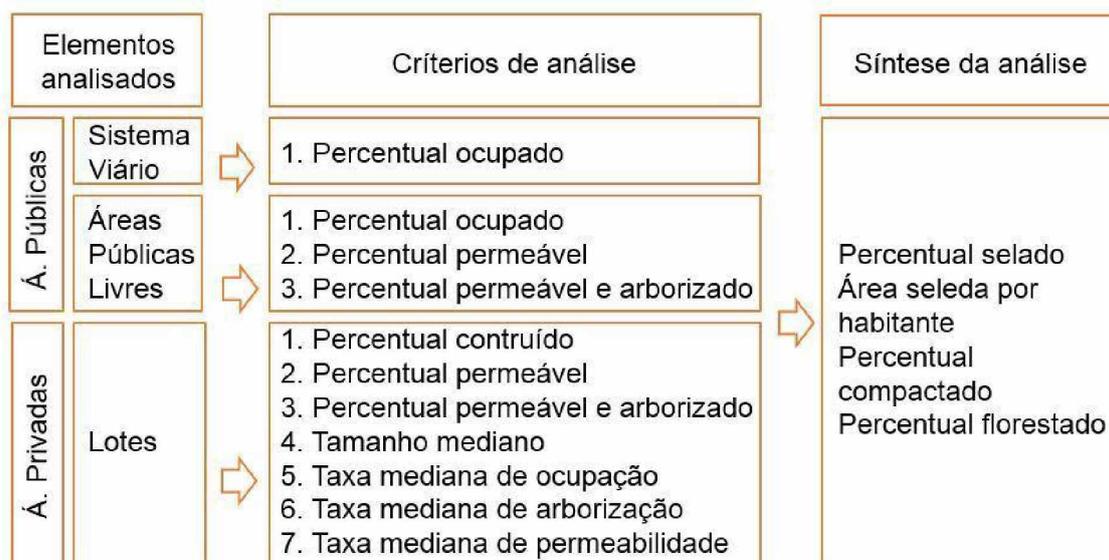
Isso demonstra que 76% das áreas urbanizadas sobre áreas de muito alto e alto potencial de recarga variam entre média e muito baixa densidade construtiva. Entretanto, essas áreas já apresentam um impacto bastante significativo sobre a recarga, principalmente quando implantadas a partir de preceitos que não procuram minimizar a perturbação do solo e direcionar o escoamento de áreas impermeáveis para áreas permeáveis com o auxílio de técnicas de drenagem sustentável. E por isso deveriam ser implantadas em áreas de menor potencial de recarga, uma vez que também os empreendimentos de baixa densidade possuem menor sensibilidade à outros condicionantes do meio físico, que limitam a urbanização nessas áreas devido a, por exemplo problemas com erosão.



**Figura 5.187** – Distribuição das zonas homogêneas de densidade construtiva na UH do Lago Paranoá. Própria autoria, 2018.

### 1.2.3. Análise dos elementos configuracionais com implicações sobre a infiltração natural da água da chuva nas tipologias identificadas

Neste tópico, as 18 tipologias urbanas agrupadas no tópico anterior, tiveram suas áreas de sistemas viários, áreas públicas livres e áreas de lotes analisados. Os critérios de análise para cada um desses elementos foram selecionados de acordo com os estudos do capítulo 3 sobre o papel do desenho urbano no desempenho hidrológico da cidade, resumidos na tabela 3.7 e na possibilidade de levantamento de dados sobre a área analisada. A partir dos critérios de análise de cada um dos elementos, cada tipologia urbana teve sua área separada, de acordo com os fatores relacionados com a perda de recarga nas áreas urbanas, também estudados no capítulo 3, conforme está apresentado na figura a seguir:



**Figura 5.19** – Organograma dos elementos e critérios de análise das tipologias urbanas identificadas na UH do Paranoá. Própria autoria, 2018.

A coleta dos dados para os critérios de análise foi feita por meio de sistema informações georreferenciadas, utilizando o programa ArcGis. A área do sistema viário foi obtida por meio do shape do siturb de “vias”, que foi transformado de linha para polígono e posteriormente ajustado manualmente de acordo com à imagem de aerofotogrametria de 2016, pela autora. Essas áreas incluem pistas e estacionamentos públicos pavimentados. Ainda na análise foram separados e consideradas superfícies permeáveis, como aquelas que permitem a passagem da água por si em direção ao solo, como gramas e solo exposto; e superfícies impermeáveis, como aquelas que não permitem essa passagem, como calçadas concretadas, acessos pavimentados a garagens estacionamentos privativos. Essas superfícies foram identificadas a partir de sensoriamento remoto de imagens de aerofotogrametria de 2016 e posteriormente ajustadas manualmente de acordo, pela autora. As áreas dos lotes e áreas construídas foram obtidas por meio de shapes do Siturb construídos de forma manual e as áreas arborizadas foram obtidos a partir de shape desenvolvido pela Codeplan construídos a partir de sensoriamento remoto das copas das árvores, ambos foram construídos com base em imagens de aerofotogrametria de 2016.

Já os dados da síntese foram obtidos pela combinação dos dados das características e com dados de população, que foram extraídos do Censo 2010, devido a necessidade de compatibilização com as pequenas áreas envolvidas na análise. As áreas seladas foram resultado da soma das superfícies impermeáveis, áreas construídas e

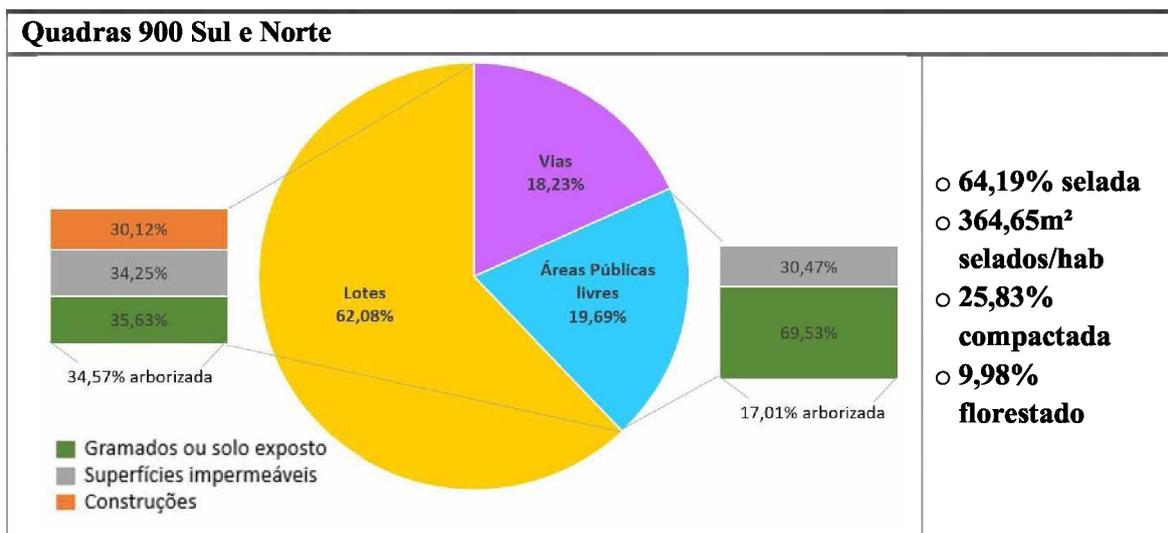
sistema viário. Foram consideradas como áreas compactadas as áreas de superfícies permeáveis não arborizadas, essa aproximação foi feita sabendo-se que da área urbanizada estuda já foram extraídas as áreas identificadas como vegetação nativa onde os solos ainda não foram perturbados (NEVES et al., 2016) e que as práticas de manejo do solo convencionais levam a uma compactação de quase toda a área desmatada e devido à dificuldade de aferir a compactação real do solo na escala do estudo. A área florestada foi dada a partir da área arborizada levantada a partir das copas das árvores, uma vez que, como discutido no capítulo 3, essas áreas apresentam maiores taxas naturais de infiltração e maior capacidade de recuperar a porosidade do solo compactado.

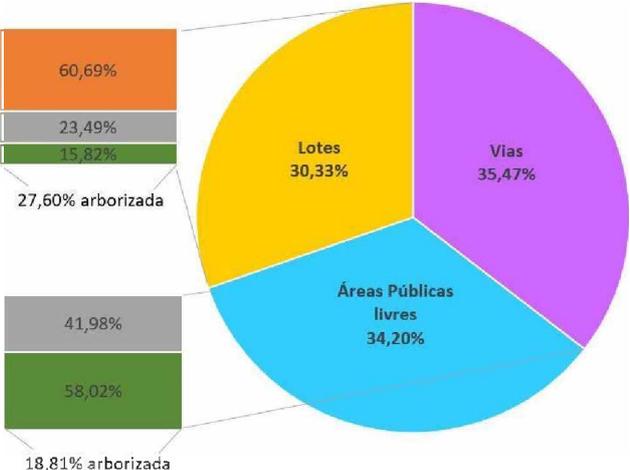
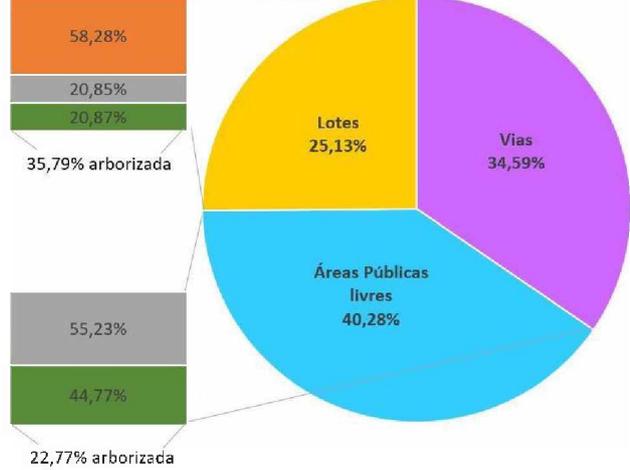


**Figura 5.8** – Imagens para visualização dos dados levantados para a análise das tipologias urbanas da UH do Lago Paranoá. Própria autoria, 2018.

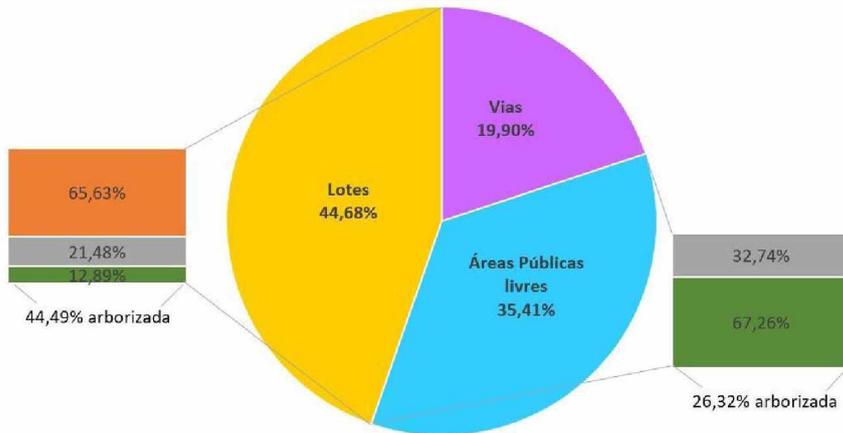
O resultado para cada tipologia pode ser conferido em seguida:

(i) Zona de muita alta densidade



<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 9.895,20m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 36,93%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 21,53%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 8,61%</li> </ul>	
<b>Setores Comercial, Bancário, Autarquias e Hoteleito Sul e Norte</b>		
		
<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 707,99m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 97,04%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 3,32%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 5,98%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>75,36% selada</b></li> <li>○ <b>(*)</b></li> <li>○ <b>19,58% compactada</b></li> <li>○ <b>5,06% florestado</b></li> </ul>
<b>Cruzeiro Novo</b>		
		
<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 406,53m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 96,39%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 0,87%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 2,46%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>76,72% selada</b></li> <li>○ <b>52,99m<sup>2</sup> selados/hab</b></li> <li>○ <b>17,29% compactada</b></li> <li>○ <b>5,98% florestado</b></li> </ul>

**Cruzeiro Velho**

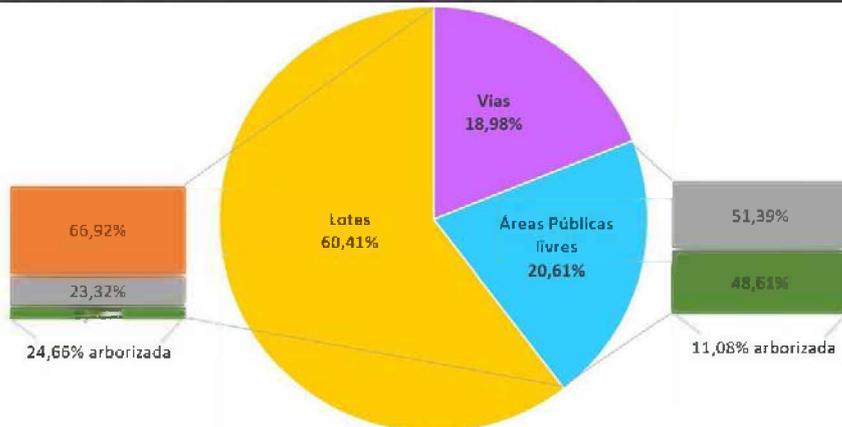


- **70,42% selada**
- **137,29m<sup>2</sup> selados/hab**
- **20,74% compactada**
- **8,83% florestado**

**Lotes**

- Tamanho mediano: 219,98m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 81,95%
- Taxa mediana de área permeável: 4,97%
- Taxa mediana de área arborizada: 7,39%

**Itapoã, Paranoá, Vila Planalto, Vila Telebrasília**

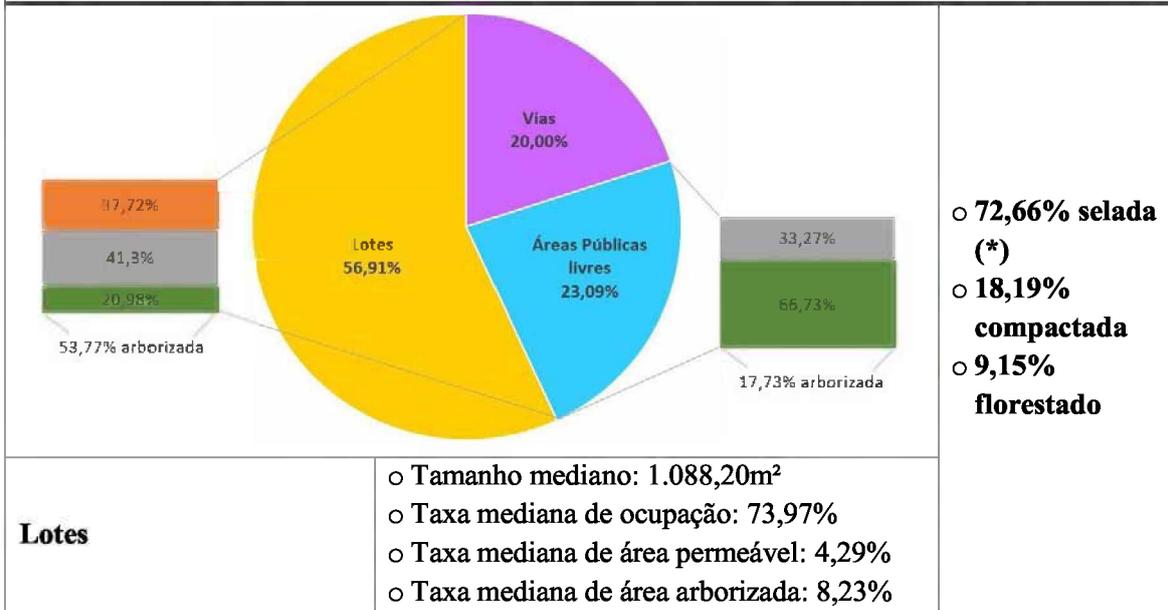


- **84,08% selada**
- **78,05m<sup>2</sup> selados/hab**
- **13,35% compactada**
- **2,56% florestado**

**Lotes**

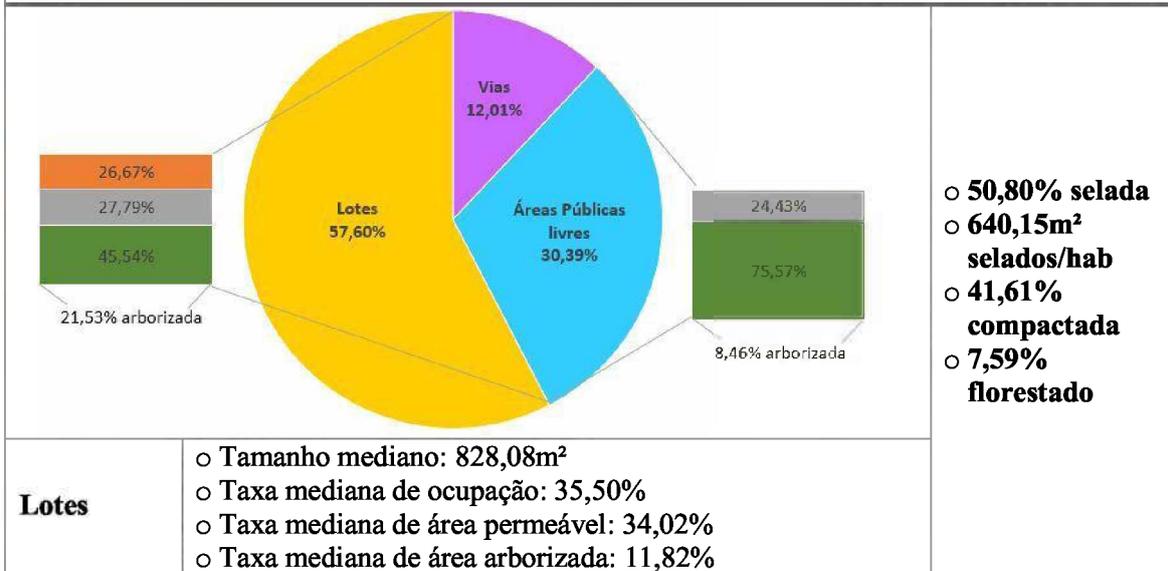
- Tamanho mediano: 142,88m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 83,96%
- Taxa mediana de área permeável: 41,46%
- Taxa mediana de área arborizada: 12,09%

**Setor de Indústrias e Abastecimento (SIA) e Setor de Indústrias Gráficas (SIG)**

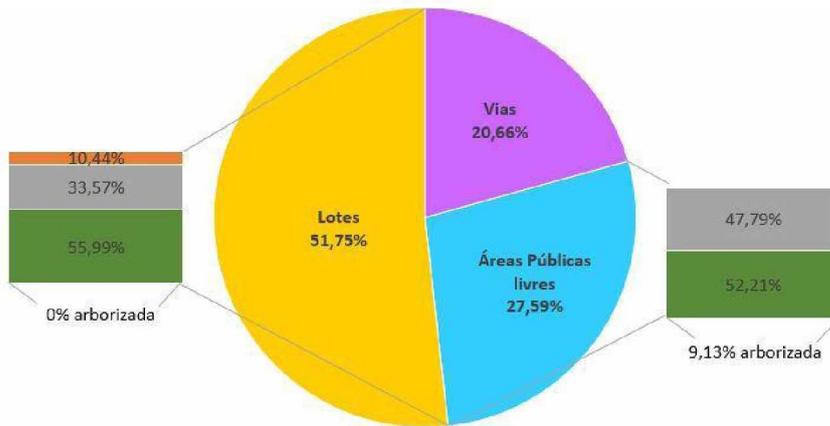


(ii) Zona de alta densidade construtiva

**Altiplano Leste, J. Botânico, S. Hab. Dom Bosco, Condomínios no taquari e Itapoã**



### Paranoá Expansão



- **56,62% selada**
- **(\*\*)**
- **42,06% compactada**
- **1,31% florestado**

#### Lotes

- Tamanho mediano: 14.361,16m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 22,29%
- Taxa mediana de área permeável: 85,09%
- Taxa mediana de área arborizada: 0%

### Sudoeste Econômico

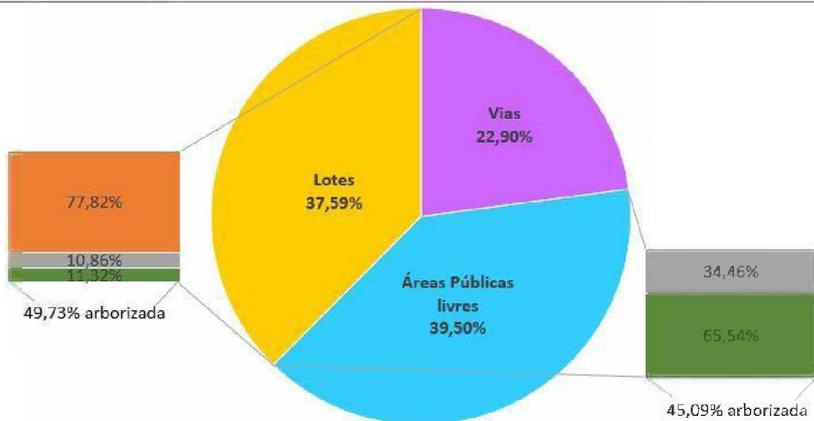


- **65,20% selada**
- **80,92m<sup>2</sup> selados/hab**
- **28,46% compactada**
- **6,34% florestado**

#### Lotes

- Tamanho mediano: 439,75m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 92,98%
- Taxa mediana de área permeável: 1,14%
- Taxa mediana de área arborizada: 5,40%

### W3 Sul e Norte



- **69,85% selada**
- **133,39m<sup>2</sup> selados/hab**
- **16,36% compactada**
- **13,79% florestado**

#### Lotes

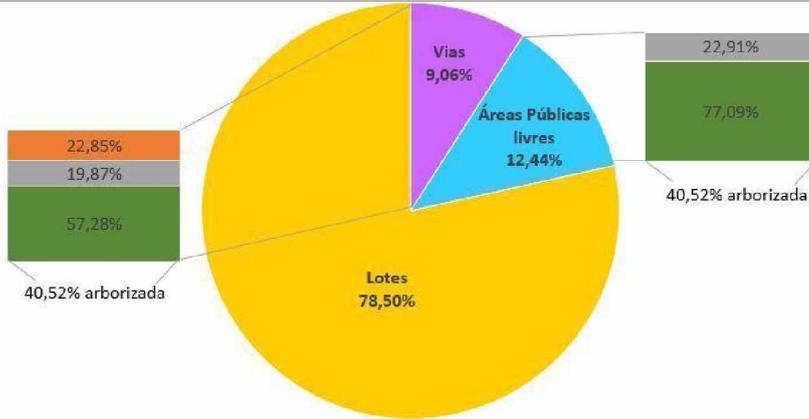
- Tamanho mediano: 205,75m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 85,41%

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 8,49%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 6,01%</li> </ul>	
--	---	--

(iii) Zona de média densidade construtiva

<b>Asa Sul e Asa Norte</b>		
<p><b>Lotes</b> 21,49%</p> <p><b>Vias</b> 24,66%</p> <p><b>Áreas Públicas livres</b> 53,85%</p> <p><b>Lotes Breakdown:</b> 62,49% (Orange) 12,05% (Grey) 25,46% (Green) 32,46% arborizada</p> <p><b>Áreas Públicas livres Breakdown:</b> 24,57% (Grey) 75,43% (Green) 41,31% arborizada</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 53,91% selada</li> <li>○ 64,93m<sup>2</sup> selados/hab</li> <li>○ 27,53% compactada</li> <li>○ 18,55% florestado</li> </ul>
<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 453,23m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 97,01%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 1,71%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 2,70%</li> </ul>	
<b>Condomínios no Itapoã e Paranoá</b>		
<p><b>Lotes</b> 77,77%</p> <p><b>Vias</b> 10,43%</p> <p><b>Áreas Públicas livres</b> 11,80%</p> <p><b>Lotes Breakdown:</b> 28,8% (Orange) 18,21% (Grey) 58,99% (Green) 26,03% arborizada</p> <p><b>Áreas Públicas livres Breakdown:</b> 20,11% (Grey) 79,89% (Green) 10,09% arborizada</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 44,70% selada</li> <li>○ 597,93m<sup>2</sup> selados/hab</li> <li>○ 42,41% compactada</li> <li>○ 12,89% florestado</li> </ul>
<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 1.044,25m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 27,76%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 57,67%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 12,59%</li> </ul>	

**Lago Sul e Lago Norte**

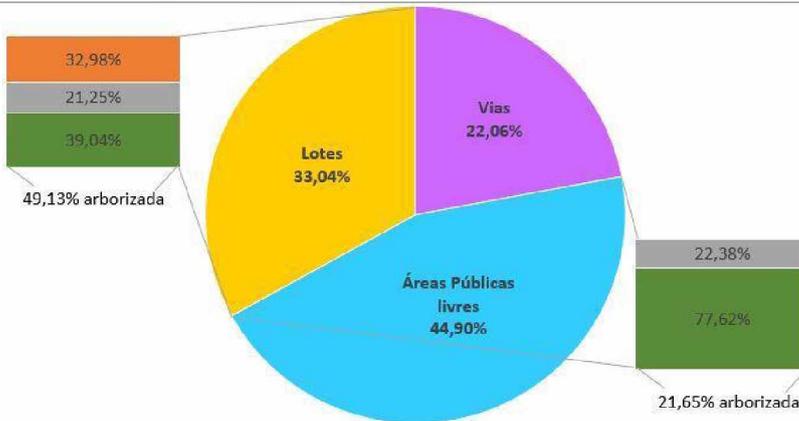


- 45,44% selada
- 506,74m<sup>2</sup> selados/hab
- 34,10% compactada
- 20,46% florestado

**Lotes**

- Tamanho mediano: 1.402,72m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 31,26%
- Taxa mediana de área permeável: 48,68%
- Taxa mediana de área arborizada: 20,72%

**Sudoeste e Octogonal**



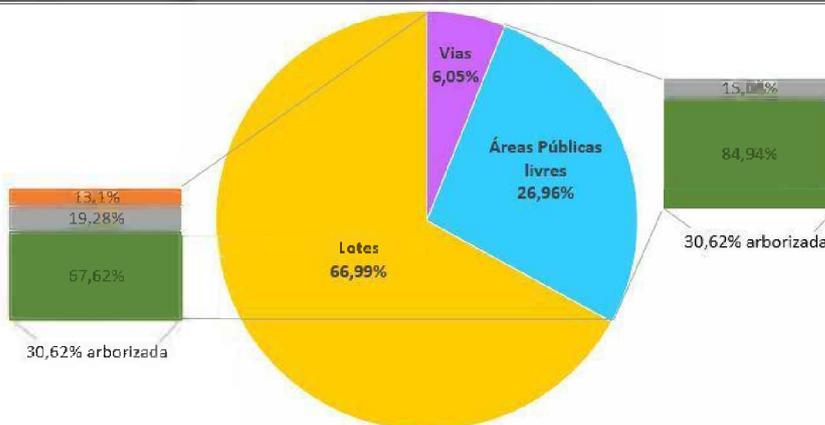
- 52,34% selada
- 59,45m<sup>2</sup> selados/hab
- 33,80% compactada
- 13,86% florestado

**Lotes**

- Tamanho mediano: 1.276,58m<sup>2</sup>
- Taxa mediana de ocupação: 94,44%
- Taxa mediana de área permeável: 4,80%
- Taxa mediana de área arborizada: 8,33%

(iv) Zona de baixa densidade construtiva

**Chácaras no Taquari e Cond. Vila Planalto**



- 31,80% selada
- 1.481,16m<sup>2</sup> selados/hab
- 49,76% compactada
- 18,44% florestada

**Lotes**

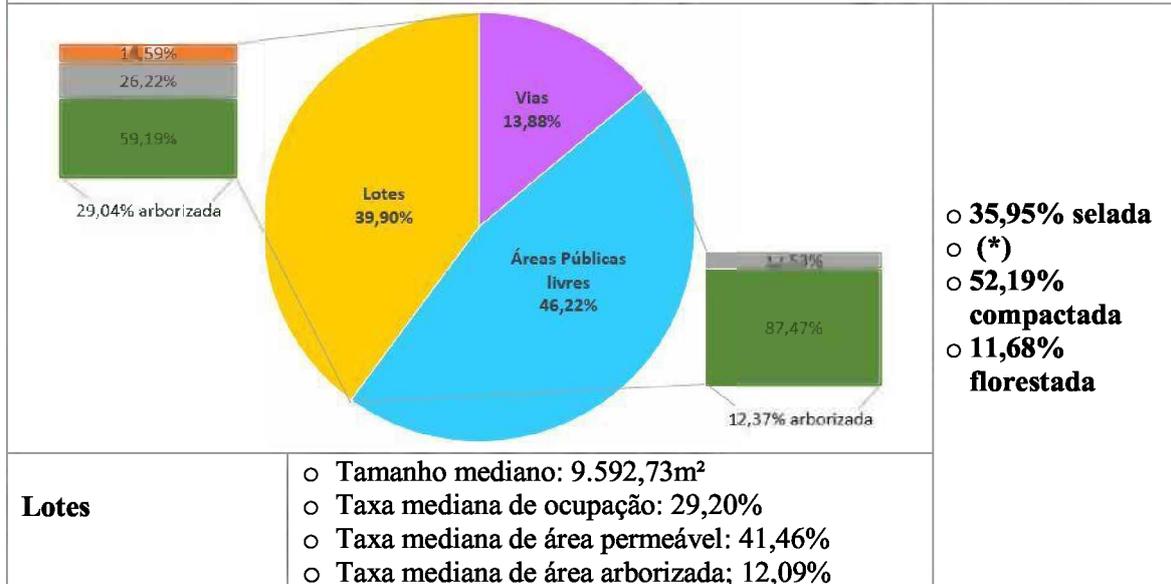
- Tamanho mediano: 642,92m<sup>2</sup>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 24,52%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 57,81%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 14,39%</li> </ul>	
<b>Mansões Lado Sul e Lago Norte</b>		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>28,23% selada</b></li> <li>○ <b>1.228,73m<sup>2</sup> selados/hab</b></li> <li>○ <b>50,12% compactada</b></li> <li>○ <b>21,65% florestado</b></li> </ul>
<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 10.794,79m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 11,50%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 72,67%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 26,03%</li> </ul>	

**(v) Zona de muito baixa densidade construtiva**

<b>Chácaras no Taquari</b>		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>24,36% selada</b></li> <li>○ <b>2.161,13m<sup>2</sup> selados/hab</b></li> <li>○ <b>45,29% compactada</b></li> <li>○ <b>30,35% florestada</b></li> </ul>
<b>Lotes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tamanho mediano: 2.672,36m<sup>2</sup></li> <li>○ Taxa mediana de ocupação: 14,16%</li> <li>○ Taxa mediana de área permeável: 69,32%</li> <li>○ Taxa mediana de área arborizada: 25,65%</li> </ul>	

**S. de Embaixadas, Clubes, UnB, Militar, Policial, Esplanada e Parques, Sul e Norte**



\*Não foram colocados os dados de área selada por habitante nas tipologias de uso predominantemente não residencial

\*\* Não foi colocado o dado de área selada por habitante para tipologia do Paranoá expansão porque não havia população na área à época do censo, 2010.

De forma geral, os dados confirmam o entendimento de que a maioria da área urbanizada teve um processo de manejo do solo convencional, sem preocupações de perturbação mínima do solo, onde grande parte das áreas dos canteiros de obra é desmatada, aplainada e posteriormente gramada, o que levou em praticamente toda a área da sub-bacia a baixas taxas de arborização, com essas grandes áreas livres funcionando como áreas compactadas, ou seja, com a porosidade do solo reduzida e consequentemente com redução considerável de suas taxas de infiltração.

Outro entendimento geral confirmado pelos dados analisados, é a importância do desenho do sistema viário, não só pelo seu maior impacto geral sobre as alterações no regime hidrológico, mas também por que ele representa grandes parcelas do total de área impermeável nas urbanizações. Na sub-bacia do Lago Paranoá esses percentuais variam entre 19,04%, nas regiões das Chácaras do Taquari e Condomínio da Vila Planto, até 49,90%, na região do sudoeste econômico. Essas áreas merecem um redesenho atendendo as técnicas de impacto mínimo estudadas no capítulo 3 para agregarem oportunidades de infiltração natural a área urbanizada<sup>24</sup>.

Ainda, foi possível aprender que um terço das tipologias analisadas concentram o maior percentual de suas áreas seladas em áreas públicas (Áreas centrais sul e norte,

<sup>24</sup> Ver mais informações no apêndice D – Análise das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá

Paranoá Expansão, W3 Sul e Norte, Asa Sul e Norte, Sudoeste e Octogonal e Setores de Embaixadas, clubes, UnB, Militar, Policial e Parques) e dois terços concentram o maior percentual de áreas compactadas em áreas públicas (Centro Sul e Norte, Cruzeiro Novo e Velho, Itapoã, Paranoá, V. Telebrasília e V. Planalto, SIG e SIA, Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco e C Taquari e Itapoã). Nesse sentido, merece destaque o fato de que os mecanismos de regulação urbana (zoneamentos, índices e parâmetros urbanísticos de parcelamento do solo e até normas de drenagem urbana) não regulamentam aspectos do desempenho desses espaços públicos que possam contribuir para o aumento das oportunidades de infiltração da água. Por outro lado, não existe, também, programas sistemáticos de governo voltados ao redesenho dessas áreas para contribuir com a infiltração e controle de inundações, a não ser por meio de soluções curativas com a utilização de obras de drenagem tradicionais.

Já a análise específica das tipologias pode ser feita tanto pelo seu impacto isolado quanto pelo seu impacto geral na sub-bacia. O impacto isolado de cada tipologia é dado pelos maiores percentuais conjuntos de áreas seladas e áreas compactadas, relacionadas a maiores alterações dos padrões de recarga dentro da própria área da tipologia. Já o impacto geral de cada tipologia na sub-bacia é dado pela menor área selada e compactada por habitante, que gera uma menor área ocupada total da região como um todo.

No grupo analisado, a tipologia que apresenta melhores condições isoladas para a recarga foi a região de chácaras do taquari de muita baixa densidade construtiva, com 30,35% de área arborizada. Essa zona ainda é uma zona de transição entre o rural e urbano, com muita baixa densidade (0,99hab/ha), grandes terrenos (2.672,36m<sup>2</sup>) e baixas taxas de ocupação (14,16%). Cabe destacar que é, também, uma área em expansão da macrozona urbana, fato que merece uma análise de impacto futuro com a implantação dos parâmetros dados a área.

As próximas tipologias com melhores condições isoladas são, em ordem: Mansões do Lago Sul e Norte (21,65% florestada), Lago Sul e Norte (20,46% florestada) e Asa Sul e Norte (18,55% florestada). Apesar dessas áreas apresentarem valores semelhantes de áreas florestadas, elas possuem outras características relacionadas com seu desenho urbano que tornam seu impacto sobre o regime hidrológico e as estratégias de intervenção diferentes.

Por exemplo, na Asa Sul e Norte, 24,66% da área total da tipologia é ocupada por sistema viário, enquanto, no Lago Sul e Norte, esse percentual cai para 9,06% e nas Mansões do Lago Sul e Norte para 6,80%. E como visto no capítulo 3 as áreas diretamente conectadas a rede drenagem, representadas principalmente pelo sistema viário, geram menores oportunidades para a recarga. O restante das áreas seladas de cada uma dessas tipologias é composto por: 45,62% de superfícies impermeáveis e 26,30% de prédios nas Mansões do Lago Sul e Norte; 40,58% de superfícies impermeáveis e 39,47% de prédios nos Lagos Sul e Norte; e 29,44% de superfícies impermeáveis e 45,74% de prédios nas Asa Sul e Norte. As áreas dos prédios representam um percentual de selamento de caráter permanente, enquanto intervenções para redução e substituição das superfícies impermeáveis ligadas aos espaços livres é mais factível<sup>25</sup>.

Ainda, o percentual total de áreas seladas da Asa Sul e Norte (53,91%) é muito próximo ao do Lago Sul e Norte (45,44%) apesar das duas áreas possuírem densidades populacionais bastante diferentes, de respectivamente 88,78hab/ha e 9,79hab/ha. Isso demonstra que maiores densidades, não estão necessariamente ligadas à maiores percentuais de superfícies impermeáveis. Outro ponto que indica que essas superfícies devem ser melhor controladas por outros parâmetros urbanísticos e que reduzir densidade não possui efetividade direta sobre infiltração.

Essa constatação da relação densidade com infiltração é especialmente importante ao analisar o impacto geral de cada tipologia na sub-bacia. Nesse segmento as três tipologias com melhores condições gerais para a recarga são, em ordem: Cruzeiro Novo (52,99m<sup>2</sup>selados/hab – 153,60hab/ha), Sudoeste e Octogonal (59,45m<sup>2</sup>selados/hab – 97,56hab/ha) e Asa Sul e Norte (64,93m<sup>2</sup>selados/hab – 88,78hab/ha). Apesar de se notar a relação clara nessas tipologias entre maiores densidades e menores valores de áreas seladas por habitante, também aqui, infere-se que outros parâmetros interferem neste resultado, uma vez que a tipologia de segunda maior densidade da área estudada, da região do Itapoã, Paranoá e V. Planalto e Telebrasília (116,63hab/ha), apresenta maior valores de área selada por habitante (78,05m<sup>2</sup>selados/ha).

Nota-se também que a tipologia específica da região da Asa Sul e Norte, elencada como terceira melhor tipologia quanto ao impacto geral, também foi elencada

---

<sup>25</sup> Ver mais informações no apêndice D – Análise das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá

como terceira melhor tipologia quanto ao impacto específico. O que demonstra que a partir de parâmetros urbanísticos é possível conciliar densidade com grande disponibilidade de áreas livres e vegetadas.

Ainda, as três com tipologias com piores condições gerais são, em ordem: Chácaras da região do Taquari de muita baixa densidade construtiva (2.161,13m<sup>2</sup>selados/hab – 0,99hab/ha), Chácaras da região do Taquari de baixa densidade construtiva e Condomínio da V. Planalto (1.228,73m<sup>2</sup>selados/hab – 2,37hab/ha) e Mansões do Lago Sul e Norte (1.418,16m<sup>2</sup>selados/hab. – 2,56hab/ha).

## **Síntese do capítulo**

A análise da alteração da cobertura do solo no âmbito do Distrito Federal nos mostrou que a mancha urbana do Distrito Federal vem crescendo numa média geométrica de 9,01% ao ano, desde 1953. A maior parte desse crescimento ocorreu sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga, sendo que, em 2016, 81,24% das áreas urbanizadas se encontravam sobre essas regiões.

Além das áreas urbanizadas outras áreas também são responsáveis por alterações nas áreas de recarga, cobrindo 50,97% do total das áreas de alto e muito alto potencial de recarga no território. Entretanto, desde 2009 a extensão dessas áreas vem diminuindo, enquanto a extensão das áreas urbanas continua a aumentar. E em 2016, o total de áreas de alto e muito alto potencial ainda cobertas por cobertura vegetal ou reflorestada já era de apenas 34,78%.

Para a análise mais detalhada do impacto da área urbanizada sobre as áreas de recarga, foi selecionada a Unidade Hidrográfica do Lago Paranoá, uma vez que essa era a segunda UH mais urbanizada do DF e possuía a maior extensão de área urbanizada sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga. Dentro dessa UH 62,90% das áreas de alto e muito alto potencial de recarga de aquíferos já estavam urbanizadas em 2016 e caso ocupe-se o restante da macrozona urbana demarcada no PDOT 2009-2012, esse percentual passará para 83,62%.

Dentro dessa UH a área urbanizada foi categorizada em 5 zonas de densidade construtivas e 18 tipologias urbanas. Todas as zonas de densidade possuem a maior parte de sua extensão sobre áreas de alto e muito alto potencial de recarga, entretanto as

que possuem menor percentual sobre essas áreas são as zonas de média (64,62%) e baixa densidade (66,07%).

A partir da análise das tipologias urbanas reforça-se vários dos entendimentos obtidos no capítulo 3, como a adoção geral manejo do solo convencional no processo de urbanização, a importância da consideração do sistema viários nas estratégias de análise e intervenção e a importância de considerar os parâmetros urbanísticos de menor impacto sobre a recarga das áreas públicas livres no planejamento e projeto urbano.

Por fim, as tipologias foram elencadas de acordo com seu impacto isolado e regional. Em adição foi ressaltada as características diferentes entre tipologias que possuem taxas de selamento e compactação semelhantes, ressaltando que as maiores densidades não estão necessariamente ligadas à maiores percentuais de superfícies impermeáveis e que o mesmo percentual de superfícies impermeáveis pode ter impactos hidrológicos distintos.

## CONCLUSÃO

A proposta da presente pesquisa foi mostrar que o planejamento urbano pode ter um papel na redução dos impactos negativos da urbanização sobre o regime hidrológico, em especial, no que tange a redução da perda de recarga dos aquíferos. Principalmente assumidas as premissas de que existem semelhanças entre as áreas propícias à recarga e as áreas propícias à urbanização e que por isso as áreas de recarga tendem a ser urbanizadas, mas que é possível ajuste nas tipologias urbanas adotadas nessas áreas para reduzir a tendência de perda de recarga gerada pelos padrões tradicionais.

Apesar dessas questões ainda persiste na área do planejamento urbano uma defasagem dos instrumentos e práticas para lidar de forma eficaz com a gestão sustentável da água no meio urbano. Para aprofundar a questão, a pesquisa começou revisando noções oferecidas pela sustentabilidade e ecologia que cedem importantes entendimentos capazes de atualizar os instrumentos e práticas do planejamento urbano de forma a promover uma manutenção do comportamento natural da água dentro da cidade. Nesse seguimento, foram constados como especialmente importantes: a compreensão das alterações geradas pela urbanização no ciclo hidrológico, utilizando o instrumento do balanço hídrico como referência; a aplicação de metodologias de planejamento ecológico para entender o território em termos de relacionamentos espaciais, cronológicos e ecossistêmicos; e o reconhecimento e valorização dos serviços ecossistêmicos urbanos.

Com essas constatações e a partir do estudo mais detalhado do funcionamento do processo de recarga e das características do meio físico que condicionam o processo de urbanização foi possível compreender e organizar a alta relação entre, principalmente, as características geomorfológicas (altitude relativa e declividade) e pedológicas (condutividade hidráulica, espessura, coesão e resistência a cargas) que favorecem esses dois processos. Sendo importante para o planejamento urbano sensível a função de recarga adotar técnicas de planejamento ecológico para identificar as regiões de confluência entre as características geomorfológicas e pedológicas identificadas e monitorar nessas regiões de confluências o balanço hídrico e serviços ecossistêmicos relacionados com o processo de recarga dos aquíferos.

Dada essas semelhanças entre as áreas adequadas para a recarga e as áreas adequadas para a urbanização, principalmente de alta densidade devido a facilidade para mecanização, maior estabilidade para fundações e utilização do subsolo, fica evidente a importância de definir como a ocupação urbana pode ocorrer de forma a minimizar o impacto sobre a recarga dos aquíferos. Nesse sentido, a partir da revisão de estudos recentes, foram identificados os principais fatores facilitadores ou dificultadores da infiltração natural da água em áreas urbanas, quais sejam: o selamento do solo por superfícies impermeáveis; a compactação das primeiras camadas do solo e a perda da vegetação arbórea.

A constatação desses fatores foi relevante para o estabelecimento dos primeiros nexos causais entre formas de ocupação do solo e impactos sobre a infiltração natural, essências para pensar as estratégias de planejamento sensível a água, ao entender que para aumentar a oportunidade para infiltração natural se deve planejar, gerir e projetar áreas urbanas procurando diminuir a extensão e conectividade das superfícies impermeáveis, diminuir a compactação solo, recuperar o solo compactado e aumentar a extensão da floresta urbana. Para complementar esse entendimento, exemplos práticos de diretrizes de desenho urbano que aumentam a oportunidade para infiltração foram buscadas em manuais das abordagens IHP, LID, WSUD e SuDs e organizadas de acordo com sua correlação com os fatores facilitadores ou dificultadores da infiltração identificados.

A revisão do tema da morfologia urbana permitiu organizar as diretrizes de desenho urbano e fatores facilitadores ou dificultadores da infiltração natural de tal forma a constituir um arcabouço teórico/metodológico capaz de auxiliar na compreensão e avaliação dos impactos de diferentes tipologias urbanas sobre a oportunidade para infiltração natural da água. Essa estrutura metodológica identificou três principais elementos configuracionais da forma urbana de maior impacto sobre o fenômeno da recarga, que são: o sistema viário; as áreas públicas livres; e os lotes. E propôs critérios de avaliação, relacionados com sua ou dificultar capacidade de facilitar a infiltração natural da água.

A organização das informações referentes aos temas da ecologia urbana, hidrogeologia e morfologia urbana, para confirmar as premissas apresentadas e constituir esse arcabouço teórico/metodológico capaz de auxiliar na compreensão e avaliação dos impactos de diferentes tipologias urbanas sobre a oportunidade para

infiltração natural da água, a partir da identificação dos elementos configuracionais relacionados aos fatores facilitadores ou dificultadores da infiltração natural e passíveis de um redesenho urbano sensível a água, são, portanto, os resultados que nos possibilitam dizer que os objetivos da pesquisa foram alcançados.

A verificação da consistência da metodologia construída na pesquisa, se deu a partir da aplicação dos conceitos na análise da relação entre tipologias urbanas e recarga dos aquíferos no Distrito Federal. A comprovação dos resultados por meio desse estudo de caso foi quantitativa em termos do levantamento de como os elementos configuracionais identificados compõe cada tipologia urbana. O possibilitou a análise qualitativa do impacto de cada tipologia na redução da oportunidade infiltração natural, a partir dos fatores facilitadores ou dificultadores da infiltração relacionados com os elementos quantificados. Dessa forma, por meio indireto, se estabeleceu a relação entre a configuração das diferentes tipologias urbanas e perda de recarga.

A partir dessa análise foi possível verificar que as áreas de alto e muito alto potencial de recarga ocupam 55,79% do território do Distrito Federal. E que as áreas urbanas vêm crescendo no território, de forma planejada e espontânea principalmente sobrepostas à essas áreas de recarga, chegando, em 2016, com 81,24% da área urbanizada do território sobreposta á áreas de recarga, o que confirma a tendência que foi constatada durante a pesquisa.

A análise das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, também confirmou as principais premissas da pesquisa, demonstrando que as diferentes tipologias de ocupação do solo urbano possuem diferentes oportunidades para infiltração natural da água, que dependem de diversos parâmetros, além da densidade e quantidade total de superfícies impermeáveis. Também foi demonstrado que as áreas de maior densidade geram um menor impacto regional na sub-bacia, já que apresentam menores quantidades de área selada por habitante. E que a partir de parâmetros urbanísticos é possível conciliar alta densidade com baixas taxas de áreas seladas e compactadas, o que conformaria uma tipologia mais adequada para ser implantadas em áreas de alto e muito potencial de recarga de aquíferos.

As principais limitações para o maior aprofundamento da pesquisa foram a transdisciplinaridade do tema, que envolvem principalmente as áreas de planejamento urbano, planejamento ecológico, hidrogeologia e engenharia ambiental; e a tecnologia

disponível para coleta e processamento de dados a partir de imagens de satélite e imagens de aerofotogrametria, que permitiu alcançar o nível de detalhamento dos dados.

Possíveis pesquisas futuras para o aprofundamento do tema incluem:

- (i) Investigações, por meio de avaliações em campo do escoamento superficial gerado por diferentes eventos de chuvas, de cada tipologia urbana identificada, com o objetivo de validar os princípios estabelecidos pela pesquisa.
- (ii) Realizar estudo da necessidade de atualização das normas urbanas (zoneamentos e índices e parâmetros urbanísticos de parcelamento do solo) para que elas se adequem aos preceitos definidos nessa pesquisa como necessários para uma urbanização de menor impacto sobre a recarga dos aquíferos;
- (iii) Aprofundar, principalmente a partir de testes de campo de taxas de infiltração, o conhecimento sobre os impactos das áreas compactadas e não arborizadas, na infiltração natural no solo de áreas urbanas da região do cerrado.
- (iv)

## Bibliografia

- ACQUASOLO. *A Água Subterrânea como recurso hídrico*. Disponível em: <[http://www.acquasolo.com.br/index.asp?op=2&area=%C1guaSubterr%E2nea&codigo=3&idioma=1&subarea=Introdu%E7%E3o&cod\\_info=4](http://www.acquasolo.com.br/index.asp?op=2&area=%C1guaSubterr%E2nea&codigo=3&idioma=1&subarea=Introdu%E7%E3o&cod_info=4)>. Acesso em: 5 jan. 2018.
- ACSELRAD, Henri. Discursos da sustentabilidade urbana. *Revista Brasileira de estudos Urbanos e Regionais*, v. 1, 1999.
- ALMEIDA, Gil Carvalho Paulo de. *Caracterização Física e Classificação dos Solos*. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- AMARAL, Rubens Do. *A prestação de serviços ecossistêmicos e a dinâmica de estoque de dióxido de carbono no Sistema de Espaços Livres do Município de Belo Horizonte*. 2015. 186 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2016*. Brasília: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf>>.
- ANDJELKOVIC, Ivan. *Guidelines on Non-Structural Measures in Urban Flood Management. International Hydrological Programme (IHP)*. Paris, France: [s.n.], 2001.
- ANDRADE, Liza Maria Souza. *Conexão dos Padrões Espaciais dos Ecossistemas Urbanos: A construção de um método com enfoque transdisciplinar para o processo de desenho urbano sensível à água no nível da comunidade e da paisagem*. 544 p. Tese de Doutorado. Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Brasília, 2014.
- ANDREOTE, Fernando Dini. *Águas Subterrâneas: apresentação de Aula*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP.
- ARNOLD, Chester L.; GIBBONS, James. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, v. 62, n. 2, p. 243–258, 1996.
- ARNOLD, J G *et al.* *Soil and Water Assessment Tool: Input / Output Documentation*. . Texas: [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2018.
- BALLARD, B. Woods *et al.* *The SuDS Manual*. . London: [s.n.], 2015.
- BARBIRATO, Gianna Melo; TORRES, Simone Carnaúba; SOUZA, Lea Cristina Lucas. *Clima Urbano e Eficiência Energética nas Edificações*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.
- BATISTELA, Tatiana Sancevero. *O Zoneamento Ambiental e o desafio da construção da Gestão Ambiental Urbana*. 2007. 159 f. Mestrado submetido à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília -UnB, 2007.
- BEAR, Jacob. *Hydraulics of Groundwater*. 2º ed. Mineola, NY: Dover Publications, 2007.
- BENEDICT, Mark A.; MCMAHON, Edward T. *Green Infrastructure – Linking Landscapes and Communities*. Washington, D.C.: Island Press, 2006.
- BENINI, Rubens de Miranda; MENDIONDO, Eduardo Mario. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. *Floresta e Ambiente*, v. 22, n. 2, p. 211–222, 2015.
- BETTENCOURT, Luísa Catarina Freitas Andrade. A cidade e a sua morfologia urbana. *Malha Urbana - Revista Lusófona de Urbanismo*. [S.l: s.n.], 2010. v. 10. p. 25–53.
- BOFF, Leonardo. *Sustentabilidade: O que é - O que não é*. Rio de Janeiro: Vozes, 2017.
- BOLUND, Per; HUNHAMMAR, Sven. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, v. 29, p. 293–301, 1999.
- BOOTH, Dereck B. Urbanization and the natural drainage system – impacts solutions and prognoses. *The northwest environmental journal*, v. 7, n. 1, 1991.
- BOOTH, Dereck B; JACKSON, C. R. Urbanization of aquatics e degradation thresholds, stormwater detention, and limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources*

- Association*, v. 33, p. 1077–1090, 1997.
- BRASIL. *Lei Nº 1.803, de 5 de janeiro de 1953 - Autoriza o Poder Executivo a realizar estudos definitivos sobre a localização da nova Capital da República*. . Rio de Janeiro: [s.n.].
- BRITO, Ana Lúcia; BARRAQUÊ, Bernard. Discutindo gestão sustentável da água em áreas metropolitanas no Brasil: reflexões a partir da metodologia europeia *Water 21. Cadernos Metrópole*, v. 19, p. 123–142, 2008.
- BROWN, R. R.; KEATH, N.; WONG, T. H F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science and Technology*, v. 59, n. 5, p. 847–855, 2009.
- BRUN, S. E.; BAND, L. E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 24, p. 5–22, 2000.
- CAMPOS, José Elói Guimarães. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a gestão dos Recursos Hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 1, p. 41–48.], 2004.
- CARPINTERO, Antonio Carlos. *Brasília: prática e teoria urbanística no Brasil (1956-1998)*. 1998. Universidade Estadual de São Paulo - USP, 1998.
- CARTER, Harold. Urban Origins: a review. *Progress in Human Geography*, v. 1, n. 1, p. 12–32, 1977.
- CARVALHO, Daniel Fonseca; BATISTA DA SILVA, Leonardo Duarte. *Ciclo Hidrológico*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006.
- CHRISTEN, Marius; SCHMIDT, Stephan. A Formal Framework for Conceptions of Sustainability - a Theoretical Contribution to the Discourse in Sustainable Development. *Sustainable Development*, v. 20, n. 6, p. 400–410, 2012.
- CHURCH, P. E.; GRANATO, G. E.; OWENS, D. W. *Basic requirements for collecting, documenting, and reporting precipitation and stormwater-flow measurements*. . [S.l: s.n.], 1999.
- CISCATI, Rafael. *Como a destruição do Cerrado pode fazer faltar água no Brasil inteiro - ÉPOCA | Blog do Planeta*. Disponível em: <<http://epoca.globo.com/ciencia-e-meio-ambiente/blog-do-planeta/noticia/2017/03/como-destruicao-do-cerrado-pode-fazer-faltar-agua-no-brasil-inteiro.html>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- CODEPLAN, Companhia do Desenvolvimento do Planalto Central. *Relatório da Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil - Relatório Cruls*. 6. ed. Brasília: CODEPLAN, 1995.
- COMISSÃO DE COOPERAÇÃO PARA MUDANÇA DA CAPITAL. *Relatório anual da Comissão de localização da nova Capital Federal*. . Brasília: [s.n.], 1955.
- CONRADIN, Katharina. *The Water Cycle SSWM*. Disponível em: <<https://www.sswm.info/category/concept/water-cycle>>. Acesso em: 27 dez. 2017.
- COSTA, Maria Helena Couto. *Urbanismo sustentável em Áreas de Proteção Ambiental*. 2008. 183 f. Universidade de Brasília, 2008.
- COUNCIL, Kiama Municipal. *Kiama Municipal Council Water Sensitive Urban Design Policy*. [S.l: s.n.], 2005.
- CREPANI, E. et al. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial*. INPE (INPE-8454-RPQ/722), p. 103, 2001.
- DISTRITO FEDERAL. *Lei Complementar Nº 854, de 15 de outubro de 2012 - Atualiza a Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009, que aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT*. . Brasília: DODF.
- DUARTE DE BRITO, Jusselma. *De Plano Piloto a metrópole: a mancha urbana de Brasília*. 2009. 237 f. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2009.
- ELMQVIST, T. et al. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current opinion in Environmental Sustainability*, v. 14, p. 101–108, 2014.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Low Impact Development (LID): A Literature Review. n. October, p. 41, 2000.
- EPA, United States Protection Environmental Agency. *Protecting Water Resource with Higher-Density Development*. . [S.l: s.n.], 2000. Disponível em: <[www.epa.gov/smartgrowth](http://www.epa.gov/smartgrowth)>.

- Acesso em: 5 maio 2018.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. *AQUASTAT - FAO's Information System on Water and Agriculture*. Disponível em: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/didyouknow/index2.stm>>. Acesso em: 4 jan. 2018.
- FARR, Douglas. *Urbanismo Sustentável: Desenho urbano com a natureza*. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- FERRARI, Irene; FERRARINI, Alessandro. From Ecosystem Ecology to Landscape Ecology: a Progression Calling for a Well-founded Research and Appropriate Disillusions. *landscape Online*, v. 6, p. 1–12, 2008.
- FERREIRA, Adriana Niemeyer Pires *et al.* *Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido*. Brasília: [s.n.], 2007.
- FOSTER, S S D; MORRIS, B L; LAWRENCE, A R. Effects of urbanization on groundwater recharge. In: TELFORD, THOMAS (Org.). *Groundwater problems in urban areas*. London: [s.n.], 1994.
- FOSTER, Stephen; LAWRENCE, Adrian; MORRIS, Brian. *Groundwater in Urban Development: Assessing Management needs and formulating policy strategies*. Washington, D.C. : [s.n.], 1998.
- GAROTTI, Leonardo Monteiro; BARBASSA, Ademir Paceli. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. *Eng Sanit Ambient*, v. 15, n. 1, p. 19–28, 2010.
- GAUTHIEZ, B. *Espace urbain – vocabulaire et morphologie*. Paris, France: Éditions du patrimoine, 2003.
- GDF, Governo do Distrito Federal. *ZEE - Caderno Técnico Matriz Ecológica*. Brasília: [s.n.], 2017.
- GDF, Governo do Distrito Federal. *Caderno Técnico ZEE: Avaliação das Estratégias de Ordenamento e Monitoramento Territorial no Período 1997-2015*. Brasília: [s.n.], 2017.
- GDF, Governo do Distrito Federal. *Documento Técnico do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal*. Brasília: [s.n.], 2008.
- GDF, Governo do Distrito Federal; GREENTEC. *ZEE - Subproduto 3.1 – Relatório do Meio Físico e Biótico*. Brasília: [s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.zee-df.com.br>>.
- GLEESON, T. *et al.* Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, v. 488, p. 197–200, 2012.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, Erik; BARTON, David N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, v. 86, p. 235–245, 2013.
- GONÇALVEZ, Tatiana Diniz. *Recursos Hídricos no Distrito Federal: Modelagem Hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na bacia do Ribeirão Pípiripau*. Tese de Doutorado. 149 p. Universidade Federal de Brasília, 2012.
- GONÇALVEZ, Tatiana Diniz. *Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal*. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília - UnB, 2007.
- GREGORY, JH *et al.* Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 61, n. 3, p. 117–124, 2006.
- GROUNDWATER GOVERNANCE. *Groundwater update flyer*. [S.l.: s.n.], [S.d.]. Disponível em: <[http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user\\_upload/groundwatergovernance/docs/general/GWG\\_updated\\_flyer\\_web.pdf](http://www.groundwatergovernance.org/fileadmin/user_upload/groundwatergovernance/docs/general/GWG_updated_flyer_web.pdf)>. Acesso em: 4 jan. 2018.
- GUERRA, Antonio José Teixeira; CUNHA, Sandra Baptista Da. *Impactos ambientais urbanos no Brasil*. [S.l.]: Bertrand Brasil, 2001.
- HAECKEL, Ernst. *Generelle Morphologie der Organismen*. Berlin, Alemanha: G. Reimer, 1866.
- HAMILTON, G. W.; WADDINGTON, D. V. Infiltration rates on residential laws in central pennsylvania. *Journal of soil and water conservation*, v. 54, n. 3, p. 564–568, 1999.
- HARRISON, Paul. *The third revolution: environment, population and a sustainable world*. London, England: I. B. Tauris, 1992.

- HILLS, George Angus. *The Ecological Basis of Land Use Planning*. [S.l: s.n.], 1961.
- HINMAN, Curtis. *Low Impact Development Technical Guidance Manual for Puget Sound*. . [S.l: s.n.], 2012
- HOGAN, Daniel Joseph *et al.* Urbanização e Vulnerabilidade Sócio-ambiental: o caso de Campinas. 2000, [S.l: s.n.], 2000. p. 397–418.
- HOUGH, Michael. *Cities and Natural Process: towards a new urban vernacular*. 1. ed. [S.l.]: Croom Helm, 1984.
- IMPERIAL, Mark T. Institutional Analysis and Ecosystem-Based Management: The Institutional Analysis and Development Framework. *Environmental Management*, v. 24, n. 4, p. 449–465, 1999.
- ILSTEDT, U. *et al.* Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports* 6:21930, Nature, 2016.
- JACOBSON, Carol R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 6, p. 1438–1448, 2011.
- KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; MAGESH, N. S. Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 7, n. 4, p. 1385–1401, 2014.
- KATES, Robert W. From the unity of Nature to Sustainability Science: Ideas in Practice. In: WEINSTEIN, MICHAEL P.; TURNER, R. EUGENE (Org.). . *Sustainability Science: The emerging paradigm and the urban environment*. New York, NY: Springer, 2012.
- KAYS, Barrett L. Relationship of forest destruction and soil disturbance to increased flooding in the suburban north carolina piedmont. 1980, New Jersey: [s.n.], 1980.
- KELLING, K. A.; PETERSON, A. E. Urban Lawn Infiltration Rates and Fertilizer Runoff Losses under Simulated Rainfall. *American society of agronomy*, v. 39, n. 2, p. 348–352, 1974.
- KRAMER, Melissa G. *Our Built and Natural Environments: A Technical Review of the Interactions Among Land Use, Transportation, and Environmental Quality*. US EPA, U.S. Environmental Protection Agency. [S.l: s.n.], 2013.
- KRONENBERG, Jakub. Urban ecosystem services. [S.d.]. Disponível em: <[http://www.sendzimir.org.pl/images/zrz\\_3\\_en/01\\_urban\\_ecosystem\\_services.pdf](http://www.sendzimir.org.pl/images/zrz_3_en/01_urban_ecosystem_services.pdf)>. Acesso em: 7 set. 2017.
- LAMAS, José M. Ressano Garcia. *Morfologia Urbana e Desenho da Cidade*. 3ª ed. Porto, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004.
- LANDSBERG, H. E. *The Urban Climate*. New York: Academic Press, 1981.
- LEE, Joong Gwang; HEANEY, James P. Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 129, n. 5, p. 419–426, 2003.
- LEE, Joong Gwang; NIETCH, Hristopher T.; PANGULURI, Srinivas. *SWMM Modeling Methods for Simulating Green Infrastructure at a Suburban Headwatershed: User's Guide*. Ohio: [s.n.], 2017.
- LETÃO, André Botequilha Leitão; AHERN, Jack. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, v. 59, n. 2, p. 65–93, 2002.
- LIMA, Jorge Enoch Furchim Werneck. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. *Ciência e Cultura*, v. 63, n. 3, p. 27–29, 2011.
- LIU, Y B; SMEDT, F De. *WetSpa Extension , A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management Documentation and User Manual*. Management. Bruxelas, Belgica: [s.n.], 2004.
- LOUSADA, Enéas Oliveira; CAMPOS, José Elói Guimarães. Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 2, p. 355–365, 2006.
- LOUSADA, Enéas Oliveira; CAMPOS, José Elói Guimarães. Proposta de modelos

- hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, p. 407–414, 2005.
- LYYTIMÄKI, J.; SIPILÄ, M. Hopping on one leg—the challenge of ecosystem disservices for urban green management. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 8, p. 309–315, 2009.
- MACHADO, Ana Lúcia S.; PACHECO, Jesuete Bezerra. Serviços Ecossistêmicos e o Ciclo Hidrológico da Bacia Hidrográfica Amazonica. *Geonorte*, v. 1, p. 71–89, 2010.
- MAKSIMOVIC, Cedo; TUCCI, Carlos E. M. *Urban Drainage in Specific Climates. Volume I. Urban drainage in humid tropics. International Hydrological Programme (IHP)*. Paris, France: [s.n.], 2001.
- MANCINI, Gisele Arrobas. *Avaliação dos custos da urbanização dispersa no Distrito Federal*. 2008. 178 f. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2008.
- MARSALEK, Jiri *et al.* *Urban Water Cycle Processes and Interactions. International Hydrological Programme (IHP)*. Paris, France: [s.n.], 2013.
- MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. *Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal*. Brasília: IEMA/ SEMATEC/UnB, 1998.
- MCHARG, Ian L. *Design with nature*. [S.l: s.n.], 1969.
- MCHARG, Ian L.; SUTTON, Jonathan; SPIRN, Anne Whiston. *Woodlands New Community Guidelines for Site Planning*. Philadelphia, Pennsylvania: [s.n.], 1973. Disponível em: <<http://www.annewhistonspirn.com/pdf/Spirn-Woodlands-1973.pdf>>. Acesso em: 5 maio 2018.
- MCPHEARSON, Timon *et al.* *Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities. BioScience*. [S.l: s.n.], 2016
- MCPHEARSON, Timon *et al.* Resilience of and through urban ecosystem services. *Ecosystem Services*, v. 12, 2015.
- MCPHEARSON, Timon; HAMSTEAD, Zoé A.; KREMER, Peleg. Urban ecosystem services for resilience planning and management in New York City. *Ambio*, v. 43, n. 4, 2014.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: synthesis*. 1. ed. Washington: Island Press, 2005.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: a framework for assessment*. 1. ed. Washington: Island Press, 2003.
- MELBOURNE WATER. *Water Sensitive Urban Design Guidelines*. [S.l: s.n.], 2014.
- MELLO, R. M.; CASTRO, C. M. Exploração de água subterrânea no Distrito Federal. *Gestão por sistema hidrogeológico*. 2011, Maceio, AL: [s.n.], 2011. p. 1–18.
- MENEGUETTI, Karin Schwabe. *De cidade-jardim a cidade sustentável : Potencialidades para uma estrutura ecológica urbana em Maringá - PR*. 2007. 205 f. Universidade de São Paulo, 2007.
- MOTA, Suetônio. *Planejamento Urbano e preservação ambiental*. Fortaleza, CE: Edições UFC, 1981.
- MYERS, N *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, v. 403, p. 853–858, 2005.
- NASCIMENTO, Nilo de Oliveira; HELLER, Léo. Ciência, Tecnologia e inovação da interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento ambiental. *Eng. sanit. ambient.*, v. 10, n. 1, p. 36–48, 2005.
- NDUBISI, Foster. *Ecological Planning: a historical and comparative Synthesis*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2002.
- NEVES, Glauber das *et al.* Padrões das mudanças da cobertura da terra no contexto das grandes bacias hidrográficas do Distrito Federal. *Textos para Discussão Codeplan*, n 19. Brasília, 2016.
- NOVAES PINTO, M. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (Org.). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2ª ed. Brasília: Editora UnB, 1994. p. 511–542.
- NUNES, R. T S *et al.* Incorporating Water Sensitive Urban Design (WSUD) practices into the

- planning context: The conceptual case for lot-scale developments. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 167, p. 341–352, 2012.
- OLIVEIRA, P T S *et al.* The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 19, p. 2899–2910, 2015.
- OLIVEIRA, Vítor; MEDEIROS, Valério. Morpho: Combining morphological measures. *Environment and Planning B: Planning and Design*, v. 43, n. 5, p. 805–825, 2015.
- PACHECO, Wesley Luis. *Águas Subterrâneas do Distrito Federal - Efeito de Sazonalidade e Características Associadas aos Isótopos De Deutério, Oxigênio e Carbono*. 2012. Universidade de Brasília, 2012.
- PALSULE, Sudhanshu S. O Desenvolvimento Sustentável e a cidade. In: MENEGAT, RUALDO; ALMEIDA, GERSON (Org.). *Desenvolvimento Sustentável e Gestão Ambiental nas Cidades: Estratégias a partir de Porto Alegre*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004.
- PANERAI, Philippe. *Análise Urbana*. 1ª ed. Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2014.
- PAVIANI, Aldo. Geografia urbana do Distrito Federal: Evolução e Tendências. *Espaço & Geografia*, v. 10, n. 1, p. 1–22, 2007.
- PICKETT, S T A *et al.* Urban Ecological systems: Linking Terrestrial Ecological , Physical , and Socioeconomic components of Metropolitan Areas. *Urban Ecosystems*, v. 32, p. 127–57, 2001.
- PITT, Robert *et al.* Compaction's Impacts on Urban Storm-Water Infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 134, n. 5, p. 652–658, 2009.
- PITT, Robert *et al.* *Infiltration through compacted urban soils and effects on biofiltration design*. [S.l: s.n.], 2003. v. 6062.
- PITT, Robert *et al.* *Infiltration through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity*. . Washignton, D.C.: [s.n.], 1999.
- POSTEL, Sandra; CARPENTER, Stephen. Freshwater Ecosystem Services. In: DAILY, GRETCHEN C. (Org.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washignton, D.C.: Island Press, 1997.
- PRINCE GEORGES COUNTY. *Low-Impact Development Design Strategies: an integrated design approach*. Department of Environmental Resources of Prince Georges County. Prince Georges: [s.n.], 2000.
- REIS, José P.; SILVA, Elisabete A.; PINHO, Paulo. Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities. *Urban Geography*, v. 37, n. 2, p. 246–271, 2016.
- REPUBLICA DOS ESTADOS UNIDOS DO BRAZIL. *CONSTITUIÇÃO DE 1891. decretada e promulgada pelo Congresso Nacional Constituinte*. Rio de Janeiro: [s.n.].
- RIBAS, Otto Toledo. *A Sustentabilidade das Cidades: Os instrumentos da gestão urbana e a construção da qualidade ambiental*. 2003. 214 p. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, 2003.
- RIBEIRO, J. f.; WALTER, B. m. t. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: M., SANO S. (Org.). . *Cerrado: ecologia e flora*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 151–212.
- REBOUÇAS, A. C. *et al.* Diagnóstico Hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo, Uso e Proteção. 1994, Recife: [s.n.], 1994. p. 93–102.
- ROSSI, Aldo. *A arquitetura da cidade*. 2ª edição ed. São Paulo, SP: WMF Martins Fontes, 2001.
- ROSSMAN, Lewis A. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. . [S.l: s.n.], 2015.
- RUSHTON, K. R. Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones. In: SIMMERS, I. (Org.). *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. [S.l.]: Springer Science, 1988.
- SACHS, Ignacy. *Caminhos para o desenvolvimento sustentável*. 1º ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2002.
- SACHS, Ignacy. Estratégias de transição para o século XXI. In: BURSZTYON, MARCEL

- (Org.). *Para pensar o Desenvolvimento Sustentável*. São Paulo, SP: Brasiliense, 1993.
- SANTOS, Ronaldo Medeiros Dos; KOIDE, Sergio. Avaliação da Recarga de Águas Subterrâneas em Ambiente de Cerrado com Base em Modelagem Numérica do Fluxo em Meio Poroso Saturado. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 2, p. 451–465, 2016.
- SCHUELER, T. R. *Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Washington, D.C.: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987.
- SHUSTER, W. D. *et al.* Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. *Urban Water Journal*, v. 2, n. 4, p. 263–275, 2005.
- SILVA, Dakir Larara M. *Ciclo Hidrológico e água Subterrânea: Dinâmica Física da terra*. [S.l.]: Universidade Luterana do Brasil.
- SILVA, Joyce Reis Ferreira Da. *Zoneamento e forma urbana: ausências e demandas na regulação do uso e ocupação do solo*. 2014. 297 f. Universidade de São Paulo, 2014.
- SILVEIRA, Luis; USUNOFF, Eduardo J. *Groundwater: Encyclopedia of life support systems*. Oxford, UK: [s.n.], 2009.
- SIMMERS, I. *Estimation of Natural Groudwater Recharge*. Antalya, Turkey: Springer-Science+Business, 1987.
- SLOCOMBE, Scott D. Implementing Ecosystem-based Management: Development of theory, practice and research for planning and managing a region. *BioScience*, v. 43, n. 9, p. 612–622, 1993.
- SOUZA, Christopher Freire; CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 2, p. 9–18, 2012.
- SOUZA, Michelle Mota De. *Determinação das áreas de recarga para a gestão de sistema de aquífero fissuro-cárstico da região de são sebastião/DF*. Dissertação de Mestrado. 84 p. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, 2013.
- SWAT, Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. Agricultural Research Service and Texas Agricultural Experiment Station. Texas, August 2009
- TANDY, Cliff. *Handbook of urban landscape*. Great Britain: The Architectural Press, 1972.
- TANG, Z. *et al.* Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*, v. 76, n. 1, p. 35–45, 2005.
- TEEB, The Economics of Ecosystems and Biodiversity. *TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management*. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <[http://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study and Reports/Additional Reports/Manual for Cities/TEEB Manual for Cities\\_English.pdf](http://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study_and_Reports/Additional_Reports/Manual_for_Cities/TEEB_Manual_for_Cities_English.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2017.
- TEIXEIRA, Wilson *et al.* Água Subterrânea. In: KARMANN, IVO (Org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 24.
- TÔSTO, Sérgio Gomes; PEREIRA, Lauro Charlet; MANGABEIRA, João Alfredo de C. *Serviços ecossistêmicos e Serviços ambientais: Conceitos e importância*. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2012/12/13/servicos-ecossistemicos-e-servicos-ambientais-conceitos-e-importancia-artigo-de-sergio-gomes-tosto-lauro-charlet-pereira-e-joao-alfredo-de-c-mangabeira/>>. Acesso em: 26 dez. 2017.
- TUCCI, Carlos E. M. Águas Urbanas. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 97–112, 2008.
- TUDELA, F. *El desarrollo sustentable y las metrópolis latinoamericanas*. México: El Colegio de México, 1996.
- UNESCO. *Vegetação do Distrito Federal: Tempo e Espaço*. Brasília: [s.n.], 2002.
- URBONAS, B. Assessment of BPM use and technology today. *Water Science and Technology*, v. 29, p. 347–353, 1994.
- VEIGA, José Eli Da. *Desenvolvimento Sustentável: o desafio do século XXI*. 3ª ed. Rio de

- Janeiro: Garamond, 2005.
- VELOSO, Serena. *Olhares sobre a crise hídrica no Distrito Federal*. Disponível em: <<https://www.noticias.unb.br/publicacoes/117-pesquisa/1155-olhares-sobre-a-crise-hidrica-no-distrito-federal>>. Acesso em: 15 nov. 2017.
- VERÍSSIMO, Monica in: UNESCO. *Vegetação no Distrito Federal: Tempo e Espaço*. Brasília, 2002
- VON HUMBOLDT, F.H.A. *Essai sur la geographie des plantes*. Paris, France: von Humboldt, 1807.
- WAGNER, Iwona; MARSALEK, Jiri; BREIL, Pascal. *Aquatic Habitats in Sustainable Urban Management: Science, policy and practice*. . Paris, France: [s.n.], 2008.
- WATER, Melbourne. *Water Sensitive Urban Design Guidelines*. . [S.l: s.n.], 2014.
- WILKEN, P. S. *Engenharia de drenagem superficial*. 1. ed. São Paulo, SP: CETESB, 1978.
- WU, Jianguo. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, v. 125, p. 209–221, maio 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204614000322>>. Acesso em: 21 out. 2017.
- WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water*. Paris, France: [s.n.], 2018.
- WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a sustainable World*. . Paris: [s.n.], 2015.
- YANG, G. *et al.* Hydro-climatic response of watersheds to urban intensity- an Observational and modeling based analysis for the White River basin, Indiana. *Journal of Hydro-meteorology*, v. 11, n. 1, p. 122–138, 2010.
- ZIEGLER, Maria Fernanda. *Cinco razões (que não a falta de chuva) para explicar a crise hídrica em SP*. Disponível em: <<http://ultimosegundo.ig.com.br/brasil/2015-01-25/cinco-razoes-que-nao-a-falta-de-chuva-para-explicar-a-crise-hidrica-em-sp.html>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

## APENDICE A

### Macrozonas Urbanas dos Planos de Ordenamento do Território do Distrito Federal e os Potenciais de Recarga de Aquíferos

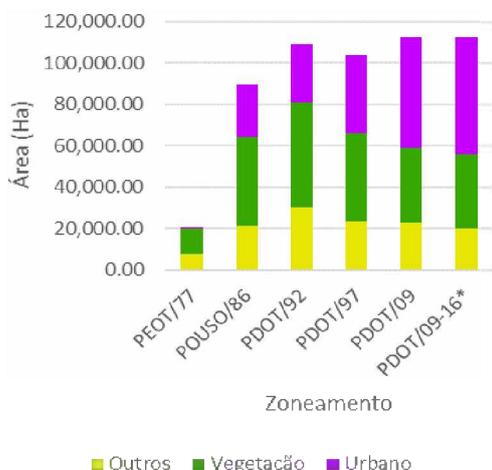
**Tabela A.3-** Tamanho e coberturas do solo das macrozonas urbanas dos planos de ordenamento do território do Distrito Federal.

Macrozona Urbana		Coberturas do solo			
Plano de Ordenamento	Área Total	Ano de levantamento da cobertura*	Outros	Vegetação Nativa e Ref.	Urbano
PEOT/77	20,240.28	1975	7,515.07	12,664.30	60.91
POUSO/86	89,418.37	1986	20,974.84	43,225.08	25,218.46
PDOT/92	109,420.16	1991	30,253.01	50,820.22	28,346.93
PDOT/97	103,931.46	1997	23,017.83	42,787.28	38,126.35
PDOT/09	112,498.73	2009	22,476.43	36,783.24	53,239.06
PDOT/09	112,498.73	2016	20,017.21	36,057.77	56,423.75

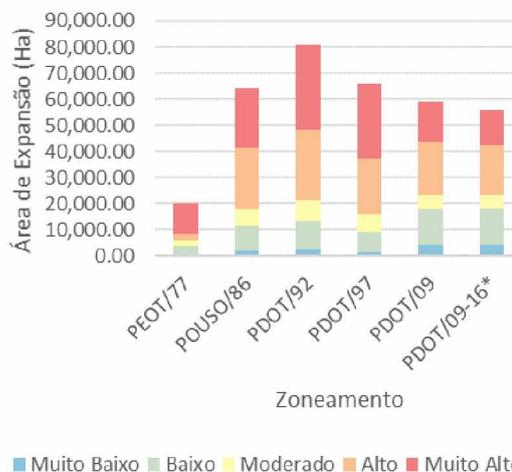
\*A data de levantamento dos dados das coberturas do solo, nem sempre coincidem exatamente com os dos desenhos das macrozonas urbanas.

**Tabela A.4 –** Cruzamento das áreas não urbanizadas dos planos de ordenamento do território do Distrito Federal com os potenciais de recarga.

Plano de Ordenamento	Áreas não urbanizadas dos planos de ordenamento				
	Potenciais de Recarga de Aquíferos				
	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto
PEOT/77	653.30	2,999.28	2,560.27	2,223.24	11,743.28
POUSO/86	1,903.56	9,703.96	6,402.65	23,525.97	22,493.59
PDOT/92	2,535.45	10,662.36	8,259.89	26,601.55	32,843.18
PDOT/97	1,524.35	7,512.12	7,080.30	21,170.13	28,482.58
PDOT/09	4,144.55	13,823.69	5,346.85	20,475.65	15,296.77
PDOT/09*	4,115.55	13,981.88	5,233.37	19,141.85	13,425.02



**Figura A.1 –** Coberturas do solo dos planos de ordenamento do DF



**Figura A.2 –** Potenciais de recarga ocupados pelas áreas não urbanizadas dos planos de ordenamentos do DF

## APENDICE B

### Alterações das Coberturas do Solo do Distrito Federal e os Potenciais de Recarga de Aquíferos

**Tabela B.1** – Cruzamento das áreas de “outras” coberturas com os potenciais de recarga de aquíferos no Distrito Federal, para os anos de 1953, 1975, 1986, 1991, 1997, 2009, 2016.

<b>“Outras” Coberturas</b>						
<b>Ano</b>	<b>Área Total</b>	<b>Potenciais de Recarga de Aquíferos</b>				
		<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
<b>1953</b>	143,166.54	1,161.38	28,756.22	8,170.96	87,277.66	16,712.45
<b>1975</b>	204,062.10	806.54	28,760.93	13,469.38	109,144.81	51,785.62
<b>1986</b>	204,071.00	836.95	27,375.21	13,566.97	109,249.22	52,947.82
<b>1991</b>	216,709.44	960.08	27,779.12	14,228.11	113,998.90	59,648.40
<b>1997</b>	220,047.02	978.42	28,399.78	14,514.61	114,334.00	61,720.50
<b>2009</b>	223,887.87	1,303.74	29,547.04	14,943.14	114,955.39	63,039.31
<b>2016</b>	219,045.25	1,300.29	29,128.02	14,895.21	112,850.26	60,778.89

**Tabela B.2** - Cruzamento das áreas da cobertura vegetal nativa e reflorestada com os potenciais de recarga de aquíferos no Distrito Federal, para os anos de 1953, 1975, 1986, 1991, 1997, 2009, 2016.

<b>Cobertura Vegetal Nativa e Reflorestada</b>						
<b>Ano</b>	<b>Total</b>	<b>Potenciais de Recarga de Aquíferos</b>				
		<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
<b>1953</b>	391,392.27	19,526.84	105,134.12	40,982.71	116,618.16	104,592.78
<b>1975</b>	350,698.11	22,275.75	118,133.81	46,740.43	92,607.12	70,776.79
<b>1986</b>	343,477.67	22,245.34	117,662.08	46,510.06	88,971.44	67,924.55
<b>1991</b>	327,209.80	22,122.08	116,851.59	45,733.55	82,592.28	59,746.08
<b>1997</b>	313,735.37	22,038.13	114,623.47	44,875.99	78,267.73	53,770.69
<b>2009</b>	295,496.86	21,602.75	110,882.15	43,453.37	72,531.41	46,875.07
<b>2016</b>	294,186.11	21,568.56	110,731.08	43,250.66	72,113.75	46,370.19

**Tabela B.3** - Cruzamento das áreas urbanizadas com os potenciais de recarga de aquíferos no Distrito Federal, para os anos de 1953, 1975, 1986, 1991, 1997, 2009, 2016.

<b>Área Urbanizada</b>						
<b>Ano</b>	<b>Total</b>	<b>Potenciais de Recarga de Aquíferos</b>				
		<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
<b>1953</b>	259.65	0.00	65.54	12.81	181.29	0.00
<b>1975</b>	18,173.67	0.31	1,370.60	474.74	12,692.09	3,635.70
<b>1986</b>	25,419.55	0.31	3,254.97	607.52	16,230.77	5,325.75
<b>1991</b>	29,050.43	0.44	3,661.56	722.88	17,861.69	6,803.63
<b>1997</b>	39,190.07	66.04	5,270.17	1,293.95	21,852.76	10,706.92
<b>2009</b>	53,612.44	176.10	7,870.01	2,288.07	26,980.17	16,283.74
<b>2016</b>	59,753.86	213.74	8,434.67	2,538.68	29,495.43	19,049.03

## APENDICE C

### Seleção da Unidade Hidrográfica de maior área urbanizada sobre áreas alto e muito alto potencial de recarga

**Tabela C.1** - Cruzamento das áreas urbanizadas com os potenciais de recarga de aquíferos nas Unidades Hidrográficas do Distrito Federal, para o ano de 2016.

Unidade Hidrográfica		Área urbanizada sobre os potenciais de recarga				
Nome	Área	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto
<b>Lago Paranoá</b>	33,748.20	24.21	2,620.37	125.99	12,275.51	1,269.40
<b>Riacho Fundo</b>	20,057.37	0.00	2,242.90	227.51	7,168.67	1,391.39
<b>Rio Melchior</b>	20,647.79	9.00	9.39	324.51	106.57	5,998.48
<b>Rib. Ponte Alta</b>	20,590.87	1.92	11.09	89.16	0.00	3,222.70
<b>Rib. do Gama</b>	15,012.41	0.00	597.90	448.71	2,707.55	61.01
<b>Rib. Sobradinho</b>	14,578.67	5.31	138.39	239.28	1,925.99	769.08
<b>Rib. das Pedras</b>	9,995.70	0.00	24.70	38.96	89.88	1,559.96
<b>Alto Rio São Bartolomeu</b>	21,178.77	0.00	221.93	203.44	1,557.71	56.81
<b>Córrego Bananal</b>	12,215.45	0.00	4.56	3.88	1,127.35	60.71
<b>Rio Alagado</b>	4,591.91	0.13	0.00	210.16	0.00	1,097.31
<b>Rib. Papuda</b>	7,375.13	25.07	600.60	66.51	735.79	321.48
<b>Rio Santa Maria</b>	2,171.83	0.00	0.00	32.54	1.15	903.40
<b>Rio Descoberto</b>	14,701.89	0.00	34.92	7.47	740.76	1.25
<b>Rib. Taboca</b>	5,370.42	104.09	503.22	155.20	0.72	672.40
<b>Rib. Saia Velha</b>	5,068.75	0.00	0.00	0.58	0.00	579.57
<b>Rib. do Torto</b>	24,595.28	0.00	682.53	67.05	242.98	126.74
<b>Baixo Rio Descoberto</b>	9,597.19	0.00	70.79	36.26	121.67	132.97
<b>Rib. da Contagem</b>	14,437.46	42.93	177.53	200.67	129.05	120.10
<b>Rio Pipiripau</b>	21,031.86	0.00	78.94	12.65	237.66	2.52
<b>Ribeirão Santana</b>	14,199.82	0.91	59.72	16.17	28.85	155.67
<b>Médio Rio São Bartolomeu</b>	19,203.35	0.00	66.10	2.21	102.84	70.51
<b>Rio Jardim</b>	38,633.15	0.00	9.41	0.00	5.82	105.51
<b>Rib. Cachoeirinha</b>	10,268.19	0.00	23.53	18.08	2.79	88.48
<b>Médio Rio Descoberto</b>	6,179.11	0.00	68.49	0.00	84.75	0.00
<b>Rib. Rodeador</b>	11,681.47	0.00	0.00	0.00	0.00	82.81
<b>Rib. Engenho das Lajes</b>	7,316.85	0.00	72.38	0.00	63.83	0.00
<b>Rib. Jardim</b>	14,189.22	0.00	0.00	0.00	31.89	26.73
<b>Baixo Rio São Bartolomeu</b>	28,562.37	0.00	49.75	0.88	0.00	45.49
<b>Rio Palmeiras</b>	9,361.34	0.00	0.07	0.00	33.60	0.00
<b>Córrego São</b>	7,981.80	0.00	0.00	0.00	0.00	27.27

<b>Bernardo</b>						
<b>Alto Rio Preto</b>	20,667.42	0.00	0.00	0.00	0.00	20.94
<b>Rio do Sal</b>	13,235.86	0.00	11.10	1.38	9.80	0.00
<b>Rio Sonhém</b>	5,611.05	0.00	2.93	0.10	0.00	2.66
<b>Alto Rio Maranhão</b>	11,430.85	0.00	10.18	0.00	2.12	0.00
<b>Alto Rio Samambaia</b>	4,594.60	0.00	0.00	0.00	0.00	1.08
<b>Rio da Palma</b>	20,349.11	0.00	5.39	0.00	0.00	0.00
<b>Rib. Santa Rita</b>	7,988.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Rib. Extrema</b>	25,554.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Rib. Jacaré</b>	18,017.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Rib. Maria Pereira</b>	4,353.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Córrego Bandeirinha</b>	477.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabela C.2** - Cruzamento das coberturas do solo da UH Lago Paranoá com os potenciais de recarga de aquíferos, para o ano de 2016.

<b>Coberturas do solo da UH Lago Paranoá</b>						
<b>Nome</b>	<b>Área total</b>	<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
<b>Área urbanizada</b>	16,315.47	24.21	2,620.37	125.99	12,275.51	1,269.40
<b>Vegetação Nativa e Reflorestada</b>	11,539.91	918.99	3,115.44	816.99	2,857.05	3,831.43
<b>Outras Coberturas</b>	1,858.04	5.55	582.37	50.25	595.55	624.31

**Tabela C.3** - Cruzamento das coberturas do solo da macrozona urbana da UH Lago Paranoá com os potenciais de recarga de aquíferos, para o ano de 2016.

<b>Coberturas do solo na macrozona urbana da UH Lago Paranoá</b>			
<b>Potencial de Recarga</b>	<b>Área urbanizada</b>	<b>Vegetação Nativa e Reflorestada</b>	<b>Outras Coberturas</b>
<b>Muito Baixo</b>	23.48	841.96	5.39
<b>Baixo</b>	2,611.40	2,766.13	552.29
<b>Moderado</b>	118.07	469.64	40.83
<b>Alto</b>	12,230.83	2,125.78	580.77
<b>Muito Alto</b>	1,224.85	1,272.16	478.07
<b>Total</b>	16,208.64	7,475.67	1,657.35

## APENDICE D

### Análise das tipologias urbanas da UH do Lago Paranoá

**Tabela D.1** - Cruzamento das zonas de densidade construtiva da UH Lago Paranoá com os potenciais de recarga de aquíferos, para o ano de 2016.

<b>Zonas de densidade construtiva e os potenciais de recarga de aquíferos</b>							
<b>Zona de densidade construtiva</b>			<b>Potenciais de Recarga de Aquíferos</b>				
<b>N</b>	<b>Nome</b>	<b>Área total</b>	<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Moderado</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
<b>1</b>	Muito Alta Densidade	2,209.95	0.00	12.76	14.27	1,768.85	414.07
<b>2</b>	Alta Densidade	963.83	21.21	50.16	101.88	522.14	265.45
<b>3</b>	Média Densidade	5,537.07	0.00	1,958.00	1.14	3,340.05	237.88
<b>4</b>	Baixa Densidade	1,461.89	0.00	494.53	1.45	756.88	209.03
<b>5</b>	Muito Baixa Densidade	5,856.07	0.00	98.88	0.00	5,725.33	31.86

**Tabela D.2** – Informações gerais das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

<b>Tipologias Urbanas da UH Paranoá</b>						
<b>Z. de Densid.</b>	<b>Nome</b>	<b>Área total</b>	<b>% AMAPR</b>	<b>Uso</b>	<b>População (Censo 2010)</b>	<b>Densidade</b>
<b>1</b>	900 Sul e Norte	552.57	99.09%	Misto	11,310.99	20.47
<b>1</b>	Centro Sul e Norte	342.46	100.00%	Comercial	1,654.79	4.83
<b>1</b>	Cruzeiro Novo	123.88	100.00%	Residencial	19,028.04	153.60
<b>1</b>	Cruzeiro Velho	136.39	100.00%	Residencial	7,489.61	54.91

1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasília e V. Planalto	643.19	96.58%	Residencial	75,014.45	116.63
1	SIG e SIA	411.46	100.00%	Industrial	3,422.45	8.32
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	462.77	61.92%	Residencial	4,006.17	8.66
2	Paranoá Expansão	145.15	100.00%	Residencial	156.64	1.08
2	Sudoeste Econômico	66.59	100.00%	Residencial	5,838.38	87.68
2	W3 Sul e Norte	289.33	100.00%	Residencial	16,177.88	55.92
3	Asa Sul e Norte	1,567.52	100.00%	Residencial	139,158.64	88.78
3	Condomínios Itapoã e Paranoá	166.79	99.90%	Residencial	1,357.52	8.14
3	Lago Sul e Lago Norte	3,418.27	42.69%	Residencial	33,453.77	9.79
3	Sudoeste e Octogonal	384.49	100.00%	Residencial	37,509.90	97.56
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	272.20	55.77%	Residencial	645.06	2.37
4	Mansões Lago Sul e Norte	1,189.68	68.43%	Residencial	3,040.26	2.56
5	Chác. Taquari	166.53	40.62%	Residencial	165.43	0.99
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	5,689.55	100.00%	Institucional e lazer	9,039.10	1.59

**Tabela D.3** – Informações sobre o sistema viário das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

Tipologias Urbanas		Sistema viário (Vias + Estacionamentos Públicos)	
Z. de densidade	Nome	Área do sistema viário	% ocupada pelo sistema viário
1	900 Sul e Norte	117.14	18.23%
1	Centro Sul e Norte	131.15	52.86%
1	Cruzeiro Novo	45.46	24.90%

1	Cruzeiro Velho	29.06	37.09%
1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasilândia e V. Planalto	132.16	9.48%
1	SIG e SIA	95.32	25.24%
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	60.63	20.26%
2	Paranoá Expansão	35.70	9.72%
2	Sudoeste Econômico	23.17	14.24%
2	W3 Sul e Norte	70.76	1.28%
3	Asa Sul e Norte	413.31	82.78%
3	Condomínios Itapoã e Paranoá	18.94	4.09%
3	Lago Sul e Lago Norte	337.95	67.51%
3	Sudoeste e Octogonal	94.58	7.12%
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	18.19	4.55%
4	Mansões Lago Sul e Norte	89.94	2.58%
5	Chác. Taquari	7.27	1.27%
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	882.52	78.75%

**Tabela D.4** – Informações sobre as áreas livres públicas das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

Tipologias Urbanas		Áreas livres públicas							
Z. de densid.	Nome	Área Livre Pública	% ocupada	Área Permeável	% permeável	Área Arborizada	% arborizada das áreas permeáveis	Área impermeável	% impermeável
1	900 Sul e Norte	126.49	19.69%	87.95	69.53%	14.96	17.01%	38.54	30.47%
1	Centro Sul e Norte	126.43	57.28%	73.36	58.02%	13.80	18.81%	53.07	41.98%
1	Cruzeiro Novo	52.94	29.73%	23.70	44.77%	5.40	22.77%	29.24	55.23%
1	Cruzeiro Velho	51.70	54.29%	34.77	67.26%	9.15	26.32%	16.93	32.74%

1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasiléia e V. Planalto	143.49	15.65%	69.75	48.61%	7.73	11.08%	73.74	51.39%
1	SIG e SIA	110.02	33.39%	73.42	66.73%	13.02	17.73%	36.60	33.27%
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	153.40	38.67%	115.93	75.57%	9.81	8.46%	37.47	24.43%
2	Paranoá Expansão	47.67	16.86%	24.89	52.21%	2.27	9.13%	22.78	47.79%
2	Sudoeste Econômico	28.92	22.24%	18.55	64.14%	3.17	17.10%	10.37	35.86%
2	W3 Sul e Norte	122.03	3.44%	79.98	65.54%	36.07	45.09%	42.05	34.46%
3	Asa Sul e Norte	902.34	92.00%	680.59	75.43%	281.14	41.31%	221.75	24.57%
3	Condomínios Itapoã e Paranoá	21.42	5.74%	17.11	79.89%	1.73	10.09%	4.31	20.11%
3	Lago Sul e Lago Norte	464.00	74.34%	357.70	77.09%	83.56	23.36%	106.30	22.91%
3	Sudoeste e Octogonal	190.94	16.34%	148.20	77.62%	32.08	21.65%	42.74	22.38%
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	80.99	18.10%	68.81	84.96%	13.73	19.96%	12.18	15.04%
4	Mansões Lago Sul e Norte	345.71	9.57%	310.29	89.75%	52.81	17.02%	35.42	10.25%
5	Chác. Taquari	45.69	7.63%	39.27	85.95%	12.68	32.29%	6.42	14.05%
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	2,939.66	94.02%	2,571.39	87.47%	317.95	12.37%	368.27	12.53%

**Tabela D.5** – Informações sobre os lotes das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

Tipologias Urbanas	Áreas de lotes (lotes + projeções)
--------------------	------------------------------------

Z. de densid.	Nome	Área total	% Ocupada	Área Construída	% Construída	Área Permeável	% permeável	Área Arborizada	% arborizada das áreas permeáveis	Área impermeável	% impermeável
1	900 Sul e Norte	398.89	62.08%	120.13	30.12%	142.11	35.63%	49.13	34.57%	256.78	64.37%
1	Centro Sul e Norte	112.12	58.13%	68.05	60.69%	17.73	15.82%	4.89	27.60%	94.39	84.18%
1	Cruzeiro Novo	33.03	28.37%	19.25	58.28%	6.89	20.87%	2.47	35.79%	26.14	79.13%
1	Cruzeiro Velho	65.24	55.60%	42.82	65.63%	8.41	12.89%	3.74	44.49%	56.83	87.11%
1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasilândia e V. Planalto	420.62	24.23%	281.46	66.92%	41.06	9.76%	10.12	24.66%	379.56	90.24%
1	SIG e SIA	271.24	73.22%	102.30	37.72%	56.90	20.98%	30.60	53.77%	214.34	79.02%
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	290.80	53.03%	77.55	26.67%	132.44	45.54%	28.52	21.53%	158.36	54.46%
2	Paranoá Expansão	89.42	23.85%	9.33	10.44%	50.06	55.99%	0.00	0.00%	39.36	44.01%
2	Sudoeste Econômico	20.37	27.78%	10.18	49.98%	6.66	32.71%	1.42	21.28%	13.71	67.29%
2	W3 Sul e Norte	116.14	2.95%	90.38	77.82%	13.15	11.32%	6.54	49.73%	102.99	88.68%
3	Asa Sul e Norte	360.11	78.54%	225.05	62.49%	91.68	25.46%	29.76	32.46%	268.43	74.54%
3	Condomínios Itapoã e Paranoá	141.23	39.75%	32.20	22.80%	83.31	58.99%	21.69	26.03%	57.92	41.01%
3	Lago Sul e Lago Norte	2,928.60	98.64%	669.21	22.85%	1,677.63	57.28%	679.74	40.52%	1,250.97	42.72%
3	Sudoeste e Octogonal	140.53	24.39%	55.81	39.71%	54.86	39.04%	26.95	49.13%	85.67	60.96%
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	201.29	49.50%	26.36	13.10%	136.12	67.62%	41.68	30.62%	65.17	32.38%

4	Mansões Lago Sul e Norte	887.82	52.54%	98.25	11.07%	639.62	72.04%	233.74	36.54%	248.20	27.96%
5	Chác. Taquari	93.83	25.40%	9.20	9.81%	71.77	76.48%	31.88	44.41%	22.07	23.52%
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	2,537.86	92.94%	370.37	14.59%	1,502.16	59.19%	436.21	29.04%	1,035.71	40.81%

**Tabela D.6** – Informações sobre o tamanho e taxa de ocupação dos lotes das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

Z. de densid.	Nome	Tamanho Médio dos lotes (m <sup>2</sup> )	Tamanho mediano dos lotes (m <sup>2</sup> )	Desvio Padrão do Tamanho dos lotes (m <sup>2</sup> )	Taxa de ocupação média	Taxa de ocupação Mediana	Desvio Padrão da taxa de ocupação
1	900 Sul e Norte	15,954.08	9,895.20	24,490.31	39.72%	36.93%	25.96%
1	Centro Sul e Norte	2,408.64	707.99	6,656.75	88.53%	97.04%	22.21%
1	Cruzeiro Novo	722.02	406.53	2,709.11	91.69%	96.39%	15.87%
1	Cruzeiro Velho	319.61	219.98	1,082.87	79.95%	81.95%	14.55%
1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasília e V. Planalto	210.06	142.88	644.03	78.06%	83.96%	19.71%
1	SIG e SIA	4,179.67	1,088.20	19,406.60	67.50%	73.97%	29.38%
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	1,012.74	828.08	3,452.72	36.71%	35.50%	20.21%
2	Paranoá Expansão	16,707.86	14,361.16	16,009.28	21.94%	22.29%	6.32%
2	Sudoeste Econômico	857.30	439.75	2,001.21	86.84%	92.98%	16.72%
2	W3 Sul e Norte	241.18	205.75	277.74	83.21%	85.41%	14.28%
3	Asa Sul e Norte	685.18	453.23	1,172.77	92.19%	97.01%	15.50%
3	Condomínios Itapoã e	1,136	1,044.25	1,191.18	28.83%	27.76%	19.00%

	Paranoá						
3	Lago Sul e Lago Norte	2,188.41	1,403.72	3,125.70	30.31%	31.26%	12.71%
3	Sudoeste e Octogonal	3,591.50	1,276.58	19,839.51	84.73%	94.44%	23.18%
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	1,997.21	642.92	4,074.55	30.03%	24.52%	22.72%
4	Mansões Lago Sul e Norte	11,232.86	10,794.79	6,909.00	13.09%	11.50%	11.77%
5	Chác. Taquari	4,730.54	2,672.36	7,304.32	18.17%	14.16%	15.52%
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	30,872.02	9,592.73	94,544.05	35.13%	29.20%	27.85%

**Tabela D.7** – Informações sobre os percentuais de áreas permeável e arborizada dos lotes das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

<b>Z. de densid.</b>	<b>Nome</b>	<b>Percentual médio de área permeável</b>	<b>Percentual mediano de área permeável</b>	<b>Desvio padrão do percentual de área permeável</b>	<b>Percentual médio de área arborizada</b>	<b>Percentual mediano de área arborizada</b>	<b>Desvio padrão do percentual de área arborizada</b>
1	900 Sul e Norte	31.65%	21.53%	29.74%	12.69%	8.61%	14.52%
1	Centro Sul e Norte	17.54%	3.32%	28.83%	15.73%	5.98%	22.85%
1	Cruzeiro Novo	18.84%	0.87%	34.07%	10.50%	2.46%	18.66%
1	Cruzeiro Velho	8.95%	4.97%	13.21%	12.07%	7.39%	14.60%
1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasília e V. Planalto	46.16%	41.46%	33.63%	11.23%	5.93%	13.88%
1	SIG e SIA	12.04%	4.29%	20.08%	10.91%	8.23%	11.06%
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	40.68%	34.02%	31.60%	17.50%	11.82%	17.98%
2	Paranoá Expansão	70.93%	85.09%	33.51%	0.00%	0.00%	0.00%

2	Sudoeste Econômico	14.10%	1.14%	30.80%	8.36%	5.40%	11.78%
2	W3 Sul e Norte	11.27%	8.49%	11.26%	9.35%	6.01%	10.14%
3	Asa Sul e Norte	22.57%	1.71%	36.65%	16.74%	2.70%	27.99%
3	Condomínios Itapoã e Paranoá	55.99%	57.67%	27.02%	16.54%	12.59%	14.25%
3	Lago Sul e Lago Norte	48.77%	46.86%	20.13%	22.60%	20.27%	15.75%
3	Sudoeste e Octogonal	26.92%	4.80%	37.46%	14.42%	8.33%	17.49%
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	54.84%	57.81%	28.81%	20.41%	14.39%	18.97%
4	Mansões Lago Sul e Norte	71.58%	72.67%	18.83%	29.04%	26.03%	20.53%
5	Chác. Taquari	63.51%	69.32%	23.82%	30.52%	25.65%	20.59%
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	46.16%	41.46%	33.63%	16.98%	12.09%	17.05%

**Tabela D.8** – Informações sobre áreas seladas, compactadas e florestadas das tipologias urbanas da UH Lago Paranoá, para o ano de 2016.

Z. de densid.	Nome	Área selada	% Selada	M <sup>2</sup> selados/hab	Área compactada	% compactada	Área florestada	% florestada
1	900 Sul e Norte	412.46	64.19%	364.65	165.96	25.83%	64.09	9.98%
1	Centro Sul e Norte	278.61	75.36%		72.40	19.58%	18.69	5.06%
1	Cruzeiro Novo	100.84	76.72%	52.99	22.73	17.29%	7.86	5.98%
1	Cruzeiro Velho	102.82	70.42%	137.29	30.29	20.74%	12.89	8.83%
1	Itapoã, Paranoá, V. Telebrasília e V. Planalto	585.46	84.08%	78.05	92.96	13.35%	17.85	2.56%
1	SIG e SIA	346.26	72.66%		86.70	18.19%	43.62	9.15%
2	Altiplano L., J. Botânico, S. Dom Bosco, C. Taquari e Itapoã	256.46	50.80%	640.15	210.04	41.61%	38.33	7.59%
2	Paranoá Expansão	97.84	56.62%		72.68	42.06%	2.27	1.31%

2	Sudoeste Econômico	47.24	65.20%	80.92	20.62	28.46%	4.59	6.34%
2	W3 Sul e Norte	215.79	69.85%	133.39	50.53	16.36%	42.61	13.79%
3	Asa Sul e Norte	903.49	53.91%	64.93	461.38	27.53%	310.90	18.55%
3	Condomínios Itapoa e Paranoá	81.17	44.70%	597.93	77.01	42.41%	23.41	12.89%
3	Lago Sul e Lago Norte	1,695.22	45.44%	506.74	1,272.03	34.10%	763.30	20.46%
3	Sudoeste e Octogonal	222.99	52.34%	59.45	144.02	33.80%	59.03	13.86%
4	Chác. Taquari e C. Vila Planalto	95.54	31.80%	1,481.16	149.52	49.76%	55.41	18.44%
4	Mansões Lago Sul e Norte	373.57	28.23%	1,228.73	663.35	50.12%	286.55	21.65%
5	Chác. Taquari	35.75	24.36%	2,161.13	66.48	45.29%	44.56	30.35%
5	Embaixadas, Clubes, UnB, S. Militar, S. Policial, Esplanada e Parques Sul e Norte	2,286.49	35.95%		3,319.39	52.19%	754.16	11.86%