



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Departamento de Ecologia

**PADRÕES SAZONAIS E ESPACIAIS DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA AS
PLANTAS E SUA INFLUÊNCIA NA RESPIRAÇÃO DO SOLO EM UM CERRADO
DENSO DO BRASIL CENTRAL**

Meyr Pereira Cruz

Brasília, DF
2006



Universidade de Brasília
Instituto de Ciências Biológicas
Departamento de Ecologia
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

**PADRÕES SAZONAIS E ESPACIAIS DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA AS
PLANTAS E SUA INFLUÊNCIA NA RESPIRAÇÃO DO SOLO EM UM CERRADO
DENSO DO BRASIL CENTRAL**

Meyr Pereira Cruz

Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de
Ecologia, da Universidade de Brasília como requisito parcial
à obtenção do Grau de Mestre em Ecologia Orientadora:
Dra. Diana Cecilia Garcia-Montiel

Brasília, DF

2006

Meyr Pereira Cruz

Dissertação aprovada junto ao Programa de Pós Graduação em Ecologia da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ecologia

Banca Examinadora:

Dra. Diana Cecília Garcia-Montiel
Orientadora – Universidade de Brasília

Profa. Dra. Mercedes Maria Cunha Bustamante
Universidade de Brasília

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos
Instituto de Geociências - Universidade de Brasília

Brasília, 15 de agosto de 2006

À Francisca e Altamiro dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Altamiro e Francisca, pelo amor, carinho e apoio por toda a vida.

Às minhas irmãs, Melina e Michele, e aos meus sobrinhos, Gustavo e Pablo Henrique, são todos maravilhosos!!!

À Diana Cecília Garcia-Montiel, minha orientadora, por sua amizade, paciência, confiança, conselhos e ensinamentos, valeu! Muito obrigada!

Ao meu namorado Willian por todo amor, incentivo e dedicação que me ajudaram a superar as dificuldades.

À Profa. Mercedes Bustamente pela amizade, além de ter gentilmente cedido a estrutura do laboratório, fornecendo suporte para o campo e análises de laboratório. Obtive apoio financeiro proveniente do Projeto Mellon Foundation para as idas ao campo e realização das análises de laboratório. Obrigada também quanto aos recursos humanos – técnicos e estagiários – disponibilizados para acompanhamento ao campo e no laboratório, onde tive pessoas, como Regina, Alessandra e Kátia para me ensinar e auxiliar.

Aos Profs. do Departamento de Ecologia, especialmente Helena Castanheira, John Hay, June Springer e Maria do Socorro, pelo convívio no Laboratório de Malacologia e, aos dois primeiros, por seu irrestrito apoio como coordenadores da pós-graduação. À Fabiana, Hugo, Bruno, Iriode e Nara pelo auxílio e paciência. Consolação, por sua amizade e, fica a pergunta: o que seria de mim sem seus cafezinhos?

Aos tantos amigos que fiz em Brasília, entre eles: Ana Paula de Oliveira, Andréa Santos, Clarissa Mendes, Meirilane Naves, Dumara, José Braz, Eduardo Chaves, Alexsander Balduino, Érica Barreto, Nascilaine e Anderson, Tomaz, Tamiel, Rosevaldo, Luis Agostinho, Ísis Meri e tantos outros. Aos amigos Adão e Fernando do mestrado da Química pela amizade e pela “escolta” até a Colina nas noites de finalização do trabalho.

À minha amiga Mariana Saraceno por acreditar muito em mim, ao Tomaz e Violeta!

Ao pessoal do laboratório do módulo 6, Maria Regina Sartori, Alessandra Kozovits, Adriano Porto, Joice Ferreira, Eddie Lenza, Kátia Sivek, Gilberto, Yuri, José Salomão, Viviane, pela amizade e apoio quer seja de campo e/ou laboratório.

Ao pessoal da Estação Ecológica de Águas Emendadas (EEAE), Planaltina-DF, especialmente Ailton, Gilvan e Sr. Miguel por sua colaboração importantíssima.

Aos membros da banca examinadora, por dedicarem seu tempo a colaborar com o trabalho.

À Capes pela bolsa concedida.

À Deus por realizar um sonho.

LISTA DE TABELAS, FIGURAS E ANEXOS

- Tabela 1. Relação das variáveis e os meses de coleta em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre abril e dezembro de 2005. NA: Dados não coletados devido a problemas técnicos.....9
- Tabela 2. Evolução de CO₂ de solo incubado (mg C.kg⁻¹ solo), no intervalo de profundidade de 0 a 5 cm do solo, em um cerrado denso na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.....38
- Figura 1. Mapa de localização do Distrito Federal e da Estação Ecológica de Águas Emendadas (EEAE), Planaltina, DF.....6
- Figura 2. Mapa da Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, mostrando a localização do transecto de estudo.....7
- Figura 3. Fotografia da vegetação do transecto de estudo, cerrado denso, localizado na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF.....7
- Figura 4. a) Medidor de resistividade terrestre Sting-Swift R1 IP (Advanced Geoscience, Inc), b) cabos contendo 56 eletrodos ao longo do transecto linear de 275 m, c) eletrodos individuais mantidos presos na superfície do solo por estacas de aço inoxidável, inseridas no solo.....10
- Figura 5. a) Esquema do arranjo Wenner, mostrando a localização dos pontos de leitura da medição utilizados para criar o perfil de resistividade. A leitura é feita por meio dos eletrodos presos na superfície do solo, que mantêm um espaçamento constante ($a = 5$ m). A cada ponto de medição, aqueles eletrodos designados a enviar a corrente elétrica (C1 e C2) ficam localizados na parte externa do arranjo, enquanto os que medem a diferença de potencial (P1 e P2) ficam na parte interna do arranjo. A designação de eletrodos que enviam e recebem corrente, assim como os que medem a diferença de potencial, é realizada por meio de um programa computadorizado (Swift) e permite medidas em vários níveis (n) Griffiths & Barker (1993), b) perfil 2D de resistividade aparente ($\Omega.m$) mostrando os pontos de medição ao longo do transecto de 275 m, c) perfil 2D de resistividade real ($\Omega.m$), resistividade invertida.....12
- Figura 6. Esquema das medições de fluxos de CO₂ ao longo do transecto de estudo, onde foram colocadas aleatoriamente 12 câmaras (4 por ponto de coleta), espaçadas por cerca de 5 metros, dos dois lados do transecto estabelecido para medir resistividade elétrica do solo.....16
- Figura 7. a) Precipitação mensal (mm) e b) precipitação diária registrada na estação Chapada da Embrapa Cerrados, (15°35'30" S, 47°42'30" W), entre janeiro e dezembro de 2005, dias de coleta de ● resistividade, ● fluxos de CO₂ e ● somente de CVA_{TGA}.....22

Figura 8. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre abril e maio de 2005.....23

Figura 9. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre junho e julho de 2005.....24

Figura 10. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre agosto e setembro de 2005.....25

Figura 11. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre novembro e dezembro de 2005.....26

Figura 12. Valores médios de resistividade ($\Omega.m$) medidos em 3 pontos de coleta localizados ao longo do transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, nas profundidades de solo de 0, 30, 50, 100 e 200 cm, obtidos entre abril e dezembro de 2005. Letras diferentes representam valores significativamente diferentes ($p<0,05$) entre meses amostrados. n.a.: não aplicado.....27

Figura 13. Valores médios de conteúdo volumétrico de água (CVA %) no solo em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, nas profundidades de solo de 0, 30, 50, 100 e 200 cm, obtidos entre abril e dezembro de 2005. As barras representam valores médios de CVA medido por resistividade e os símbolos representam o CVA medido pelo método gravimétrico (TGA). As letras diferentes, para o gráfico de barras, representam valores significativamente diferentes ($p<0,05$) entre os meses amostrados. n.a.: não aplicado.....30

Figura 14. Valores de água disponível para as plantas (ADP mm) obtida em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Emendadas, Planaltina, DF, nos intervalos de profundidade 0-50 cm, 50-100 cm e 100-200 cm, obtidos entre abril e dezembro de 2005. As barras representam valores médios de ADP medido por resistividade e os símbolos representam o ADP medido pelo método gravimétrico (TGA). As letras diferentes, para o gráfico de barras, representam valores significativamente diferentes ($p<0,05$) entre os meses amostrados. n.a.: não aplicado.....31

Figura 15. a) Relação entre os valores de conteúdo volumétrico de água (CVA %) estimados pelos métodos de resistividade (CVA_{RES}) e gravimétrico (CVA_{TGA}), b) Relação entre os valores de água disponível para as plantas (ADP mm) estimados pelos métodos de resistividade (ADP_{RES}) e gravimétrico (ADP_{TGA}). As linhas representam as regressões lineares: linha descontinua as regressões obtidas e linha contínua 1:1 para permitir a comparação como se o $R^2 = 1.0$32

Figura 16. Fluxos totais de CO₂ do solo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), medidos em 3 pontos de coleta entre maio e dezembro de 2005, ao longo de um transecto de 275 m, em uma área de cerrado denso, localizada na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF.....34

Figura 17. Fluxos de CO₂ do solo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), medidos em 3 pontos de coleta, ao longo de um transecto de 275 m, em uma área de cerrado denso, localizada na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005. Os símbolos representam o conteúdo volumétrico de água (CVA %) determinados pelo método gravimétrico, entre 0 e 5 cm de profundidade do solo, obtidos no mesmo dia das medições de fluxos de CO₂ do solo, a seta indica a ocorrência das primeiras chuvas, b) Déficit de saturação do ar (DSA kPa). Fonte dos dados de temperatura e umidade relativa do ar EMBRAPA-CPAC, Planaltina, DF. Letras diferentes representam meses para os quais foram encontrados valores significativamente diferentes ($p < 0,05$). n.a.: não aplicado.....35

Figura 18. Fluxos de CO₂ do solo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) em função da água disponível para as plantas (mm) – ADP_{RES} – entre 0 e 50 cm de profundidade do solo, obtidos em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.....36

Figura 19. a) Carbono da biomassa microbiana do solo (mg C.kg^{-1} solo), b) taxa de respiração basal da biomassa microbiana ($\text{g CO}_2.\text{h}^{-1}.\text{CBM}$), no intervalo de profundidade de 0 a 5 cm do solo, em um cerrado denso na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.37

Figura 20. Biomassa de raízes grossas e finas (kg.m^{-3}) em uma área de cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As barras horizontais representam os desvios padrão.....40

Anexo 1. Análise textural e pH do Latossolo Vermelho em uma área de cerrado denso próxima ao transecto de estudo, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. Os dados de análise textural são de Bezerra (2003).....55

Anexo 2. Valores médios de temperatura T (°C) a 2,5 e 5 cm de profundidade do solo, temperatura do ar interno das câmaras T (°C) utilizadas nas medições de fluxos de CO₂ do solo nos três pontos de coleta, da Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.....56

RESUMO

Nos ecossistemas savânicos da região do Cerrado, a disponibilidade de água é um dos fatores altamente determinantes da estrutura florística e dos processos biogeoquímicos do ecossistema. A respiração do solo é um dos processos que pode ser afetado pela disponibilidade de água no solo. Este trabalho teve como objetivos: 1) investigar se as variações espaciais e sazonais da água disponível para as plantas, entre 0 e 200 cm de profundidade do solo, podem afetar a respiração do solo, e 2) se as variações na respiração do solo são melhor explicadas em função da sazonalidade da precipitação ou da heterogeneidade espacial da distribuição da água do solo. Para avaliar a distribuição espacial e temporal da água no solo, este estudo utilizou a técnica de perfil bidimensional (2D) de resistividade, que está sendo pioneiramente usada em estudos ecológicos para estimar o conteúdo de água no solo. O estudo foi realizado em área de cerrado denso, localizado na Estação Ecológica de Águas Emendadas (EEAE), Planaltina, DF. A coleta de dados foi realizada entre abril e dezembro de 2005 em 3 áreas de coleta (P1, P2 e P3) estabelecidas ao longo de um transecto de resistividade de 275 m. Estas áreas de coleta apresentaram características contrastantes em termos da distribuição de água ao longo do perfil do solo. Em cada área de coleta foram feitas medições dos fluxos de CO₂ do solo e amostras de solo foram coletadas para determinações do conteúdo gravimétrico de água, carbono da biomassa microbiana (CBM), taxa de respiração basal microbiana (TRB) e biomassa de raízes. Os dados de resistividade medidos para estas áreas foram extraídos com programas de GIS e convertidos em valores de conteúdo volumétrico de água (CVA) e água disponível para as plantas (ADP) por meio de calibrações da resistividade com sensores do tipo reflectômetro de domínio temporal (TDR). Os fluxos de CO₂ foram determinados com um analisador de gás infravermelho e as determinações de CBM e TRB seguiram o método clorofórmio fumigação incubação (CFI). Os resultados obtidos mostraram a grande heterogeneidade tanto espacial como temporal de resistividade, CVA e ADP, mas somente efeito marginalmente significativo ($p=0,052$) da heterogeneidade espacial na respiração do solo, e não significativo ($p>0,01$) para CBM e TRB. Em escala de tempo os resultados indicaram um efeito altamente significativo ($p<0,01$) da sazonalidade da precipitação sobre os valores de fluxos de CO₂ do solo, CBM e TRB. O P1 apresentou os menores valores de resistividade

e maiores valores de CVA e ADP em todos os meses de estudo. O P2 obteve os maiores valores de resistividade e menores de CVA e ADP. Os valores totais dos fluxos de CO₂ do solo encontrados foram 56,7 (P1), 52,4 (P2) e 51,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P3). O mês de maio apresentou os menores valores de resistividade (2626 $\Omega.\text{m}$), maiores de CVA (26,8%) e ADP (135,8 mm), e novembro os maiores valores de resistividade (18382 $\Omega.\text{m}$), menores de CVA (16,6%) e ADP (19,7 mm). O mês de setembro apresentou os menores valores de respiração do solo (0,9 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e o mês de maio os maiores valores (4,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). A biomassa total de raízes grossas (> 2 mm) até 50 cm de profundidade do solo foi de 19,38 no P1; 8,79 no P2 e 5,22 kg.m^3 no P3. A biomassa total de raízes finas (< 2 mm) encontrada até 50 cm foi de 2,56 no P1; 2,72 no P2 e 3,18 kg.m^3 no P3. A biomassa de raízes grossas e finas se concentrou nos primeiros 30 cm de profundidade do solo nos P1 e P2, tendo redução significativa com o aumento da profundidade do solo. Por outro lado, o P3 a biomassa de raízes grossas teve sua maior contribuição relativa entre 30-50 cm de profundidade do solo. Enquanto a respiração do solo foi influenciada pela variação espacial de forma marginal, a sazonalidade da precipitação afetou marcadamente a respiração do solo.

ABSTRACT

In the savannas ecosystems from the Cerrado region, water availability is one of the most important factors determining its floristic structure and the dynamics of biogeochemical processes. Soil respiration is one of those processes that can be really affected by water availability in soil. The mayor objectives of this study were: 1) to investigate how spatial and seasonal variations in water availability for plant uptake up to 200 cm of soil depth would affect soil respiration and 2) to determine which source of variation, spatial or seasonal, have the strongest effect on soil respiration. The research was conducted in an area of Cerrado denso located within the ecological station of Águas Emendadas (EEAE), Planaltina, DF. To evaluate spatial and temporal variation of water distribution in soil, this study used the two-dimensional (2D) resistivity technique, usefully applied for geological studies. Data collection was carried out between the months of April and December of 2005, in three different areas (P1, P2, P3) selected along the 275-m resistivity transect. These areas differentiated by their contrasting characteristics in terms of water distribution along the soil profile. The monthly CO₂ fluxes were measured using four chambers installed within each sampling area along the resistivity transect, and soil were collected for determination of gravimetric soil water content, carbon microbial biomass (CMB), index of microbial base respiration (MBR) and root biomass. Raw resistivity data obtained for each area was extracted through the use of a GIS program and then converted to volumetric soil water content (VWC) and plant available water (PAW) through calibration of resistivity values with Time Domain Reflectometer (TDR) sensors. A comparison between gravimetric and resistivity methods to determine soil water content are presented. The CO₂ fluxes were determined by the infrared gas analyzer technique and CMB and MBR were determined with the chloroform fumigation technique. Results from this study showed large spatial and temporal variation in resistivity, VWC and PAW along the resistivity transect; however, spatial heterogeneity produced an effect marginally significant ($p=0,052$) on the CO₂ fluxes, and a not significant effect on CMB and TRB ($p>0,1$). Temporal variation due to seasonality produced a highly significant effect on CO₂ production from soil, CMB e TRB. The area of P1 showed the lowest resistivity and the higher CVA and ADP in all months of this study. By constrast the area of P2 the highest resistivity and the

lower CVA and ADP. The total CO₂ fluxes was 56,7 (P1), 52,4 (P2) and 51,2 μmol.m⁻².s⁻¹ (P3). The month of May presented the lowest resistivity values (2626 Ω.m) and the higher CVA (26,8%) and ADP (135,8 mm). By contrast, the month of November presented the higher resistivity values (18382 Ω.m), but the lowest VWC (16,6%), PAW (19,7 mm). The month of September presented the lowest CO₂ fluxes (0,9 μmol.m⁻².s⁻¹) and the month of May the highest values (4,2 μmol.m⁻².s⁻¹). Total coarse root biomass (> 2 mm) up to 50 cm of soil depth was the highest in P1 (19.38 kg.m³), followed by P2 (8,79), and then P3 (5,22 kg.m³). Total fine root (<2mm) biomass up to 50 cm of soil depth was the highest in P3 (3.18 kg.m³), followed by P2 (2,72), and then P1 (2,52 kg.m³). The largest contribution of total root biomass was observed within the first 30 cm of soil depth at P1 and P2, but at P3 the largest contribution was observed between 30-50 cm of soil depth. This study concluded that along the studied transect, spatial heterogeneity exerted a very marginal effect on the variation of soil respiration, while the pronounced changes in soil water distribution due to seasonality produced a larger affect on soil respiration.

INTRODUÇÃO

Em savanas tropicais, a disponibilidade de água é um dos fatores altamente determinantes da estrutura florística e funcionamento biogeoquímico do ecossistema (Walker & Langridge, 1997; Singh *et al.*, 1998). Um dos processos que pode ser fortemente afetado por esta sazonalidade é a respiração do solo (Miranda *et al.*, 1997; Rocha *et al.*, 2002; Santos *et al.*, 2003), processo através do qual o CO₂ é produzido no solo e transferido para a atmosfera. A respiração do solo é produto dos processos da decomposição heterotrófica da serapilheira e matéria orgânica do solo, e da respiração das raízes. As taxas de produção de CO₂ nos solos e sua transferência para a atmosfera têm um papel importante no ciclo global do C (Schlesinger & Andrews, 2000). Além disso, o CO₂ é um gás traço importante na medida em que contribui para o efeito estufa (Schlesinger, 1997).

Em escala global, o aumento do conteúdo de água e da temperatura nas camadas superficiais do solo influencia a atividade microbiana e respiração das raízes, resultando em um aumento do fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera (Amundson & Davidson, 1990; Raich & Schlesinger, 1992; Davidson *et al.*, 2000; Pinto *et al.*, 2002; Varella *et al.*, 2004). Além da variação temporal associada a sazonalidade, a produção de CO₂ do solo também apresenta grandes variações espaciais que podem influenciar na quantificação deste gás (Amundson & Davidson, 1990; Raich & Schlesinger, 1992). A variação espacial da respiração do solo pode estar relacionada ao tipo de vegetação presente através da entrada da matéria orgânica no solo, atividade microbiana, atividade radicular e metabolismo microbiano ao nível da rizosfera (por meio da decomposição de exsudatos produzidos pelas raízes), sendo que a distribuição da vegetação pode ser influenciada pela distribuição de água no solo. A ocorrência de fogo também pode propiciar a variação espacial de fluxo de CO₂ do solo, embora os efeitos do fogo parecem ser menos intensos do que o efeito do teor de umidade do solo (Pinto *et al.*, 2002). Quanto ao ecossistema, o Cerrado parece ser uma fonte pequena de CO₂ durante a estação seca e sumidouro na estação chuvosa (Miranda *et al.*, 1996; Miranda *et al.*, 1997; Rocha *et al.*, 2002; Santos *et al.*, 2003).

Os ecossistemas savânicos, que formam a região do Cerrado, se caracterizam por estar submetidos a uma distribuição da precipitação anual que é marcadamente sazonal (Assad & Evangelista, 2001). A média anual da precipitação está entre 1200 e 1800 mm, sendo que em geral as chuvas se concentram entre outubro e abril, e a estação seca ocorre

entre maio e setembro. Na estação seca, as plantas do estrato arbóreo regulam o fluxo de água por meio de mecanismos, tais como forte controle estomático (Miranda *et al.*, 1997; Meinzer *et al.*, 1999; Bucci, 2001) ou da sua capacidade de extrair água de grandes profundidades (Jackson *et al.*, 1999; Bezerra *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2005; Garcia-Montiel *et al.*, submetido). Devido a tais adaptações os processos dinâmicos que caracterizam os ecossistemas do Cerrado também estão, de forma geral, adaptados à sazonalidade do regime de precipitação, por este motivo alguns autores consideram que a água parece não ser um fator limitante para a vegetação (Miranda *et al.*, 1997; Franco, 2002). O bioma Cerrado possui fisionomia e composição florística bastante variada, caracterizada por uma mistura de plantas de dois estratos bem distintos. O estrato arbóreo inclui árvores e arbustos, enquanto que o estrato rasteiro é composto por subarbustos e herbáceas (Eiten, 1972; Oliveira-Filho & Ratter, 2002). As diferenças fisionômicas da vegetação do cerrado também podem ser determinadas pelas flutuações sazonais do nível do lençol freático (Furley & Ratter, 1988; Oliveira-Filho *et al.*, 1989).

Estudos feitos na região do Cerrado mostram que a vegetação, principalmente a do estrato arbóreo depende, durante a estação seca, da água distribuída nas camadas mais profundas do solo, sendo este fato de importância fundamental para a manutenção do ciclo hidrológico e das funções do ecossistema (Rawitscher, 1948; Furley & Ratter, 1988; Oliveira-Filho *et al.*, 1989; Quesada *et al.*, 2004; Bezerra *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2005). Em outros estudos conduzidos em ecossistemas de florestas e savanas tropicais (Nepstad *et al.*, 1994; Hodnett *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 1999; Moreira *et al.*, 2003; Bezerra *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2005), o conteúdo de água nas camadas mais profundas do solo tem sido avaliado por meio de técnicas que permitem somente medições pontuais. Algumas destas técnicas incluem medições através de análises de isótopos de hidrogênio, sensores do tipo reflectômetro de domínio temporal e sondas de nêutron. Entretanto, estas técnicas não permitem avaliar a heterogeneidade espacial do ambiente subterrâneo, a qual certamente pode afetar, de forma indireta, os processos biogeoquímicos importantes do ecossistema, através do efeito direto na distribuição da vegetação e da matéria orgânica do solo.

Este estudo utilizou a técnica de perfil bidimensional (2D) de resistividade geelétrica como uma ferramenta que pode possibilitar ter uma ampla visão do ambiente subterrâneo em grande profundidade e extensão espacial, sem produzir grandes perturbações

do solo. A técnica dos perfis 2D de resistividade tem sido amplamente usada para determinar e mapear a distribuição da resistividade do ambiente subterrâneo em grande profundidade. A técnica foi desenvolvida durante os anos 1990 como resultado de um grande esforço para desenvolver uma ferramenta para mapear áreas de complexidade geológica moderada (Griffiths & Barker, 1993). O objetivo destes estudos pioneiros foi detectar variações laterais e verticais nos valores de resistividade elétrica causadas por diferenças na textura do solo e estrutura de outros materiais. As medidas de resistividade são feitas por meio da injeção de corrente elétrica na superfície do solo utilizando um arranjo de eletrodos, conectados entre si por cabos. O produto resultante é um perfil 2D, o qual apresenta a distribuição da resistividade ao longo do perfil do solo. Esta técnica tem sido utilizada com sucesso em estudos ambientais (Tabbagh *et al.*, 2000), para determinar flutuações da água subterrânea e lençóis freáticos (Seaton & Burbey, 2002). Mais recentemente, perfis de resistividade permitiram avaliar o impacto do desmatamento e plantações de espécies comerciais para o seqüestro de C e sua influência no aumento da salinidade e acidez das água subterrâneas (Jackson *et al.*, 2005).

HIPÓTESES

A disponibilidade de água no solo influencia a produção de CO₂ através do efeito nos processos de atividade microbiana, e crescimento e metabolismo das raízes. Devido ao fato de que este efeito é ainda mais marcado em ecossistemas submetidos a secas prolongadas, espera-se que uma grande proporção da variação observada na produção de fluxos de CO₂ do solo sejam explicadas pelas variações espaciais e temporais que afetam os processos anteriores.

OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho foram:

1) Determinar de que forma variações sazonais e espaciais na resistividade, conteúdo volumétrico de água e água disponível para as plantas podem afetar parâmetros do ciclo do carbono, tais como a produção de fluxos de CO₂ do solo e carbono da biomassa microbiana.

2) Determinar se as variações observadas nos valores respiração do solo são melhor explicadas em função da variação temporal (sazonal) ou em função da variação espacial da resistividade, conteúdo volumétrico de água (CVA), água disponível para as plantas (ADP).

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em uma área de cerrado nativo (15°33'37"S – 47°34'42" W) dentro da Estação Ecológica de Águas Emendadas (EEAE), localizada a 45 km da cidade de Brasília – Distrito Federal (Figuras 1 e 2). A fitofisionomia da área de estudo é classificada como cerrado *stricto sensu* (s.s.), com cobertura arbórea entre 50% a 70% e altura média

entre 5 a 8 m, representando uma das formas mais densas e altas do cerrado, conhecida como cerrado denso (Felfili & Silva, 1993; Ribeiro & Walter, 1998; Felfili *et al.*, 2004) (Figura 3). Num estudo da florística e fitossociologia da EEAE (Silva & Felfili, 1996) foram identificadas 585 espécies distribuídas em 103 famílias para todas as fitofisionomias. Este mesmo estudo registrou uma diversidade maior para EEAE em comparação ao Parque Nacional de Brasília e da APA Gama-Cabeça de Veado, outras duas unidades de conservação dentro do Distrito Federal. A precipitação média anual registrada durante 22 anos na estação Chapada da Embrapa Cerrados foi de 1553 mm. Durante o ano de realização deste estudo foi registrado um total pluviométrico de 1460 mm, sendo este valor 6% abaixo da precipitação média anual, enquanto que 93% das chuvas se concentraram na estação chuvosa (Figura 7a).

O Distrito Federal pertence à Província Hidrogeológica do Escudo Central, a qual inclui parte da Faixa de dobramentos Brasília, ocupando a Faixa de dobramentos Paraguai/Araguaia e a parte sul do Cráton Amazônico (Mente, 2000; Campos, 2004). Os solos mais comuns na região são os Latossolos, os quais representam aproximadamente 46% dos solos do bioma Cerrado (Haridasan, 1993). No transecto de estudo o Latossolo Vermelho é caracterizado por uma textura argilosa (Anexo 1), apesar de ter comportamento de solos com textura mais grossa quanto as características de infiltração e retenção de água. A estrutura do solo consiste em agregados estáveis, devido ao alto teor de óxidos de Fe e Al, além de serem solos bem drenados e profundos. Em geral, são solos de acidez moderada a forte (Anexo 1), que possuem pequeno teor de bases nas rochas parentais (quartzitos, ardósias, filitos, metassilitos e micaxistos) e alto grau de intemperismo. Os Latossolos Vermelho são considerados de baixa fertilidade, característica essa evidenciada pelas baixas percentagens de saturação de bases, capacidade de troca catiônica (CTC) e soma de bases trocáveis (Resck, 1981; Haridasan, 1993; Reatto *et al.*, 1998; Motta, 2002).

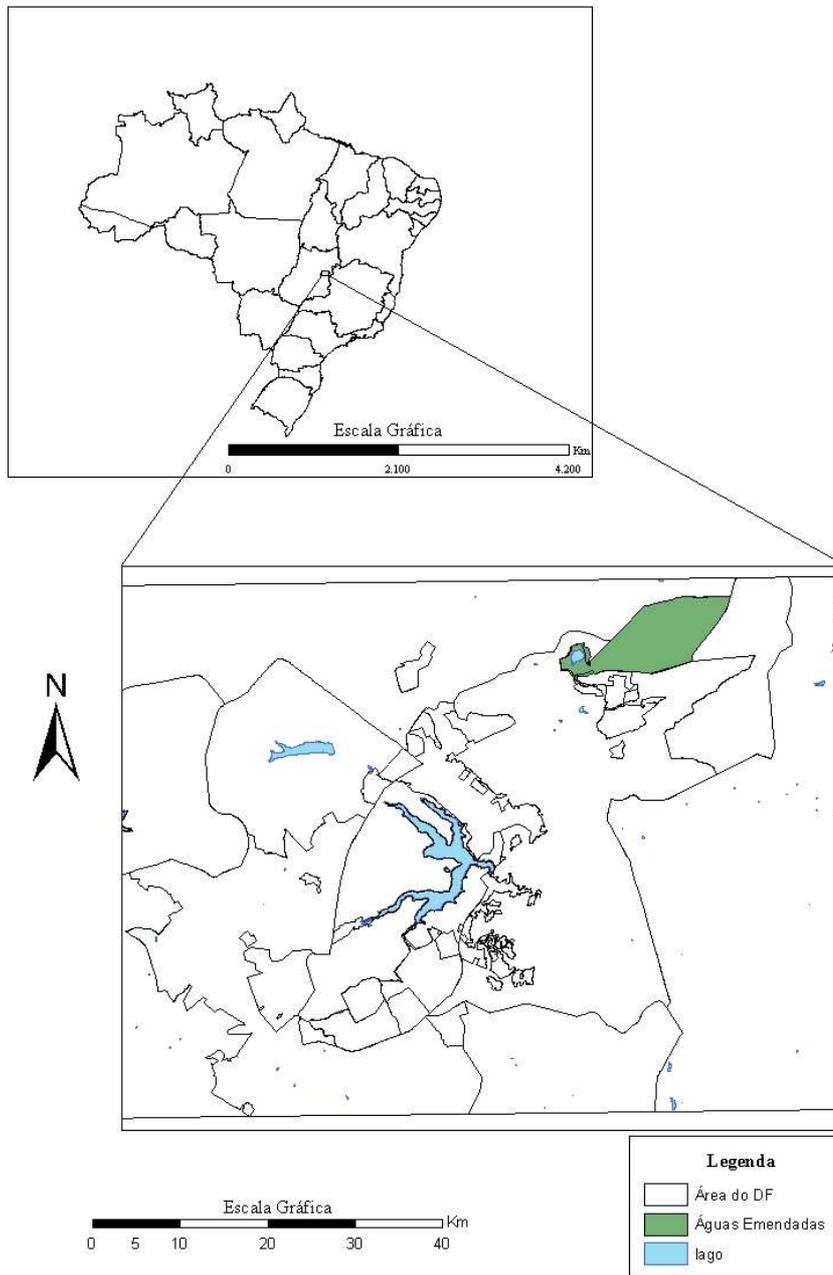


Figura 1. Mapa de localização do Distrito Federal e da Estação Ecológica de Águas Emendadas (EEAE), Planaltina, DF.

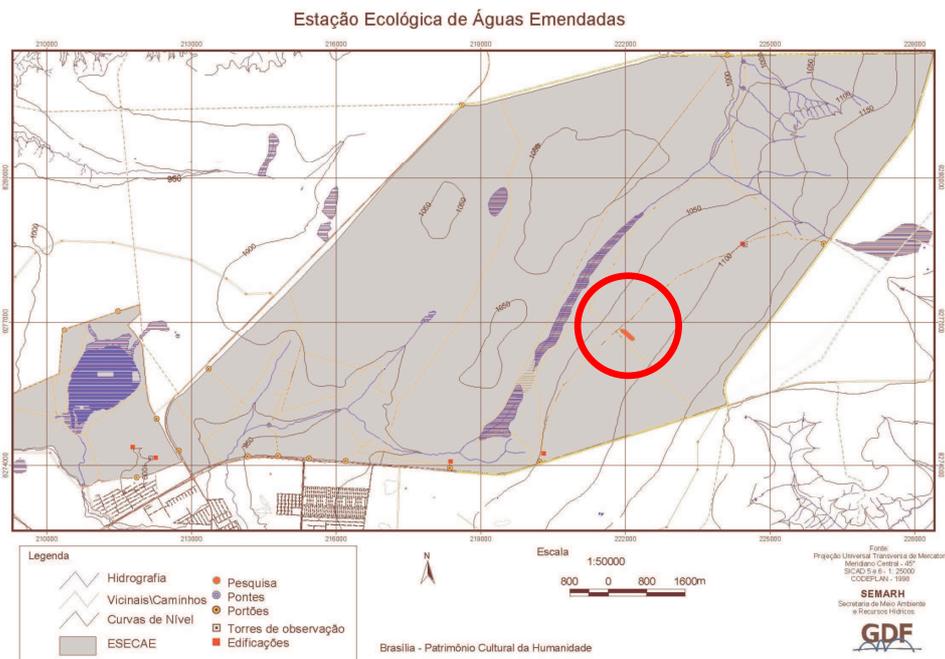


Figura 2. Mapa da Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, mostrando a localização do transecto de estudo.



Figura 3. Fotografia da vegetação do transecto de estudo, cerrado denso, localizado na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF.

MATERIAL E MÉTODOS

Os perfis bidimensionais de resistividade do solo foram obtidos entre os meses de abril e dezembro de 2005, ao longo de um transecto de 275 m. A figura 2 mostra a localização deste transecto na área da EEAE, o qual foi estabelecido durante estudos prévios, realizados para implementar a utilização de perfis 2D de resistividade como ferramenta que auxilie na determinação da disponibilidade de água para as plantas a escalas que incluem variações espaciais de paisagem (Garcia-Montiel *et al.*, submetido). Para o propósito deste estudo, este transecto foi escolhido por demonstrar um gradiente horizontal muito claro nos valores de resistividade (Figuras 8-11). As determinações do fluxo de CO₂ e carbono da biomassa microbiana do solo foram conduzidas em três pontos de coleta, denominados P1, P2 e P3, estabelecidos ao longo deste mesmo transecto de resistividade, os quais tinham 10 m de comprimento, localizados nos intervalos de distância de 30 a 40 m, 115 a 125 m e 230 a 240 m, respectivamente a partir do ponto de início de 0 m de distância. Estas três áreas ao longo do transecto de medições foram escolhidas de acordo com estudos anteriores (Ferreira, 2006; Garcia-Montiel, submetido), os quais indicaram que elas apresentam diferenças contrastantes nos valores de resistividade. Estas diferenças são evidenciadas pela presença da cor azul na porção norte do transecto (Figuras 8-11), a qual indica maiores condições de condutividade e menor resistividade, portanto assume-se maior conteúdo de água em direção ao lado norte do transecto.

A cada mês, a coleta de dados foi realizada em dois dias: Dia 1 – medições de resistividade e coleta de solos para a determinação do teor de umidade (TGA), entre 0 e 200 cm de profundidade do solo; Dia 2 – medições do fluxo de CO₂ e coletas de solo para determinar o teor de umidade (0-5 cm) e carbono da biomassa microbiana. As medições de resistividade não necessariamente foram feitas 1 dia antes às de fluxos de CO₂ do solo, entretanto foram consecutivas. Por exemplo, medição de fluxo de CO₂ do solo no dia 06 de julho e 07 de julho de resistividade. Um esquema detalhado das coletas é apresentado na Tabela 1. Devido a problemas técnicos os dados de resistividade no mês de outubro e fluxo de CO₂ do solo no mês de novembro não puderam ser obtidos. O baixo conteúdo de umidade do solo observado no mês de outubro, não permitiu obter um bom contato entre os eletrodos e o solo para a passagem de corrente elétrica. Isto provocou uma grande proporção

de valores de resistividade com alto desvio-padrão entre duas medições feitas no mesmo ponto.

Tabela 1. Relação das variáveis e os meses de coleta em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre abril e dezembro de 2005. NA: Dados não coletados devido a problemas técnicos.

Meses	Resistividade	TGA	Fluxos de CO ₂ TGA 0-5 cm	Amostras de Solos	Raízes grossas e finas
Abril	X				
Maio	X	X	X	X	
Junho	X	X	X	X	
Julho	X	X	X	X	
Agosto	X	X	X	X	
Setembro	X	X	X	X	
Outubro	NA	X	X	X	
Novembro	X	X	NA	X	
Dezembro	X	X	X	X	X

1. RESISTIVIDADE DO SOLO

Medições de resistividade foram conduzidas no início de cada mês (Tabela 1) com um medidor de resistividade terrestre (Figura 4a) disponível comercialmente Sting-Swift R1 IP (Advanced Geoscience, Inc). Ao longo do transecto linear de 275 m foram colocados 56 eletrodos conectados a cabos (Figura 4 b e c), o que permitiu cobrir a área do perfil. A separação entre os eletrodos ao longo do transecto foi de 5 m, resultando em um perfil de resistividade do solo com no máximo 37 m de profundidade. Os eletrodos individuais foram mantidos presos na superfície do solo por estacas de aço inoxidável, inseridas no solo e equipadas com um elástico metálico para fixar o eletrodo (Figura 4c).

a)



b)



c)



Figura 4. a) Medidor de resistividade terrestre Sting-Swift R1 IP (Advanced Geoscience, Inc), b) cabos contendo 56 eletrodos ao longo do transecto linear de 275 m, c) eletrodos individuais mantidos presos na superfície do solo por estacas de aço inoxidável, inseridas no solo

As medidas de resistividade do solo consistiram em injetar uma corrente elétrica contínua no solo através de dois eletrodos que enviam correntes (C1 e C2) e mais dois eletrodos (P1 e P2) que medem a diferença de voltagem resultante. As medidas de voltagem e corrente foram obtidas por meio de um alinhamento de eletrodos, colocados na superfície do chão ao longo de uma linha de medida (transecto de 275 m). Os valores de resistividade aparente foram então calculados por meio da intensidade conhecida da corrente injetada (I), e a diferença na voltagem (ΔV). O produto resultante foi um perfil que mostra a distribuição da resistividade no ambiente do subsolo.

Um sistema computadorizado (Swift), conectado ao medidor de resistividade e cabos, seleciona automática e sistematicamente, combinações de eletrodos de corrente e potencial ao longo do transecto para obter medidas nas várias posições horizontais e verticais específicas ao longo do perfil 2D (Figura 5b e c). A configuração que determinou a combinação de eletrodos de corrente e potencial para a medição da resistividade elétrica do solo utilizou o arranjo Wenner (Figura 5a). Uma das características deste tipo de arranjo é de produzir uma alta resolução de estruturas horizontais e um bom sinal (Sharma, 1997), tendo sido sugerida para pesquisas onde a profundidade a ser investigada é relativamente baixa (< 50 m) (Seaton & Burbey, 2002). Além disso, o fato de o arranjo Wenner utilizar poucos pontos de medidas em relação a outros arranjos diminui o tempo de obtenção de dados. Durante as medições de resistividade, os eletrodos são fixos no solo, enquanto que o sistema computadorizado Swift seleciona, em cada medição, a combinação dos eletrodos a serem utilizados para enviar correntes elétricas ou detectar a diferença de potencial. As medições realizadas foram repetidas por duas vezes e as diferenças de até 5% foram aceitas. As medidas de resistividade aparente feitas no campo foram automaticamente invertidas utilizando-se o software EarthImager 2D desenvolvido pela Advanced Geosciences, Inc. (2004).

Uma vez obtidos os perfis 2D de resistividade, os valores de resistividade para cada profundidade do solo foram extraídos por meio de técnicas de interpolação que resultam na

extração de dados usando o “GIS software IDRISI Kilimanjaro versão 14-02” (Eastman, 2003). Os dados brutos de resistividade invertidos foram salvos como “Arquivos de Dados de Resistividade Universal”, os quais foram logo convertidos em arquivos de vetores IDRISI, utilizando-se ferramentas de conversão do IDRISI. Uma triangulação Delaunay não limitada foi produzida dos pontos de vetores de cada perfil de solo por meio do modelo de rede irregular de triangulação (TIN) do GIS software. Os atributos da superfície TIN foram então interpolados para gerar uma imagem dos quais os valores de resistividade nas profundidades específicas foram extraídos. Para este estudo os valores de resistividade foram extraídos nas profundidades de 0, 30, 50, 100 e 200 cm.

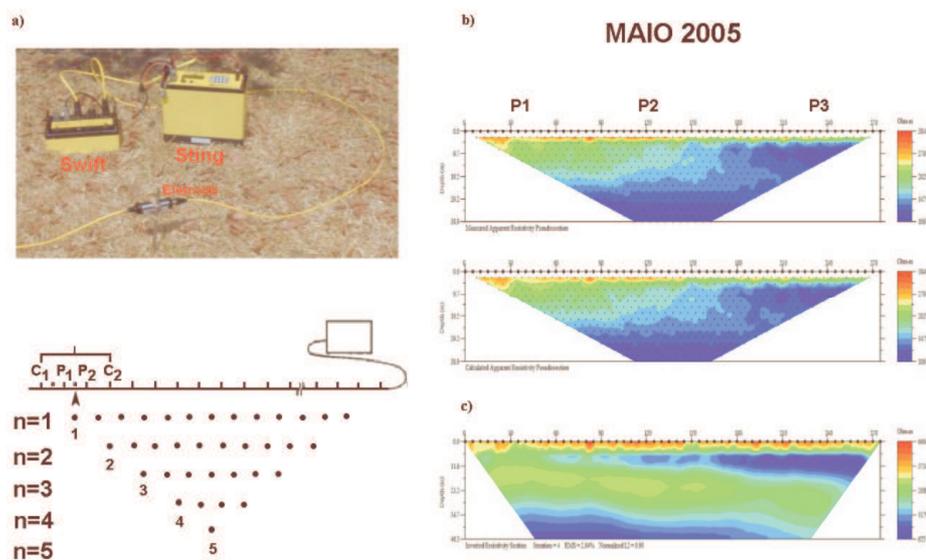


Figura 5. a) Esquema do arranjo Wenner, mostrando a localização dos pontos de leitura da medição utilizados para criar o perfil de resistividade. A leitura é feita por meio dos eletrodos presos na superfície do solo, que mantêm um espaçamento constante ($a = 5$ m). A cada ponto de medição, aqueles eletrodos designados a enviar a corrente elétrica (C1 e C2) ficam localizados na parte externa do arranjo, enquanto os que medem a diferença de potencial (P1 e P2) ficam na parte interna do arranjo. A designação de eletrodos que enviam e recebem corrente, assim como os que medem a diferença de potencial, é realizada por meio de um programa computadorizado (Swift) e permite medidas em vários níveis (n) Griffiths & Barker (1993), b) perfil 2D de resistividade aparente ($\Omega.m$) mostrando os

pontos de medição ao longo do transecto de 275 m, c) perfil 2D de resistividade real ($\Omega.m$), resistividade invertida.

As calibrações das medidas de resistividade do solo, foram feitas através de estimativas do conteúdo volumétrico de água (CVA) obtidas por meio de sensores do tipo reflectômetro de domínio temporal (TDR) ou "*time domain reflectometers*" (Bezerra *et al.*, 2005), em áreas de cerrado denso na EEAE. Os sensores do tipo TDR foram distribuídos ao longo do perfil de solo, em três poços escavados de até 8 m de profundidade localizados em áreas próximas ao transecto de estudo. Perfis de resistividade na área dos poços foram realizados ao mesmo tempo em que as medições de CVA com TDR foram obtidas. Mudanças na resistividade do solo foram calibradas com as medidas de CVA obtidas por meio dos TDR, permitindo assim transformar os valores de resistividade em conteúdo volumétrico de água no solo (Garcia-Montiel *et al.*, submetido) de acordo com a fórmula:

$CVA \% = 12,9952 - \ln R/0,1913$ ($r^2 = 0,8$; $p < 0,001$), em que R é o valor de resistividade medido no campo.

2. CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA (CVA_{RES}) E ÁGUA DISPONÍVEL PARA AS PLANTAS (ADP_{RES}) ESTIMADOS POR MEIO DE RESISTIVIDADE

A porcentagem do conteúdo volumétrico de água foi estimada ao longo do transecto de 275 m por meio dos dados de resistividade extraídos até 200 cm de profundidade, utilizando a função de regressão descrita anteriormente.

A capacidade de retenção de água no solo está relacionada à textura do solo. Em geral, a água do solo que está contida entre a capacidade de campo (Reichardt, 1988) e o ponto de murcha permanente é a principal fonte de água para as plantas (Resck, 1981). Os valores de ADP são freqüentemente estimados a partir dos valores do conteúdo volumétrico de água em um determinado momento (θ) e do conteúdo volumétrico de água residual (θ_r) - o qual é estimado por meio de curvas de retenção de água (Van Genuchten, 1980) obtidas por métodos de laboratório. O valor de ADP foi estimado de acordo com a equação (Bezerra *et al.*, 2005):

$$ADP_{real} = \frac{1}{2} [(\theta_2 + \theta_1) - (\theta_{r2} + \theta_{r1})] \cdot (z_2 - z_1) \cdot 10 \text{ (mm)}$$

Na qual os índices 1 e 2 indicam as posições superior e inferior de uma determinada camada de solo, em z (cm) para cada intervalo de profundidade.

Para os propósitos deste estudo, o conteúdo de água residual foi considerado como o ponto no qual o menor valor de TDR foi medido ($\theta_r = 0,13$) e não como o valor determinado pelas curvas de retenção de água. O valor de água residual estimado pelas curvas de retenção de água assume que o limite menor para extração de água pelas plantas ocorre a uma tensão máxima de +1,5 MPa, no entanto é provável que a maior parte das plantas do cerrado estejam adaptadas a extrair água do solo em condições de potencial hídrico menores do que -1,5 MPa. Neste estudo, este pressuposto garante o uso do $\theta_r = 0,13$ como um valor mais realístico para a determinação de ADP.

3. CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA DO SOLO (CVA_{TGA}) E ÁGUA DISPONÍVEL PARA AS PLANTAS (ADP_{TGA}) DETERMINADOS POR MEIO DE MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS

As determinações do teor gravimétrico de água (TGA) obtidas a partir das coletas de solo até 200 cm de profundidade, feitas no mesmo dia que as medições da resistividade (Tabela 1), foram usadas para estimativas diretas de CVA_{TGA} e ADP_{TGA} . Em cada ponto de coleta de CO_2 do solo, amostras de solo foram obtidas usando um trado de 5 cm de diâmetro nas profundidades de 0-5 cm, 5-10, 50, 100, 150 e 200 cm, colocadas em latas de alumínio hermeticamente fechadas e transportadas para o laboratório para a determinação de TGA. No laboratório, as amostras úmidas de solo foram colocadas na estufa a 105°C por 72 horas e logo pesadas para obter peso seco do solo e estimar TGA. O conteúdo volumétrico de água do solo, foi calculado por meio do teor gravimétrico de água do solo através da seguinte fórmula:

$$CVA_{TGA} \% = (P_u - P_s / P_s) \times \text{densidade do solo} \times 100$$

Onde P_u é peso úmido = (peso do solo úmido + peso do recipiente); P_s é peso seco = (peso do solo seco + peso do recipiente)

As amostras de solo para o cálculo da densidade do solo foram coletadas somente uma vez nos mesmos dias da coleta para quantificar a biomassa de raízes (ver abaixo). Devido ao fato de que a biomassa de raízes foi quantificada até a profundidade de 50 cm, neste estudo a densidade de solo foi determinada somente para os primeiros 50 cm de profundidade (0-5cm, 5-10cm, 10-30cm, 30-50cm). Porém, para a densidade de solo entre 100 e 200 cm de profundidade este estudo utilizou os mesmos valores de densidade do solo registrados por Bezerra *et al.* (2005), os quais foram obtidos em área de cerrado denso próxima à área do presente estudo. A densidade do solo utilizou a fórmula:

$$\text{Densidade do solo (g.cm}^3\text{)} = \frac{Ps}{98,13}$$

Onde Ps=peso do solo seco e 98,13 é o volume do cilindro usado na coleta de solo.

A água disponível para as plantas – ADP_{TGA} – foi calculada de forma similar ao cálculo de ADP_{RES} descrito acima, exceto que os valores do conteúdo volumétrico de água (θ) foram substituídos pelo valor de CVA_{TGA} obtido para cada profundidade (0, 50, 100 e 200 cm).

Devido ao fato de que estes valores de CVA e ADP foram obtidos por meio de métodos gravimétricos que usam diretamente a diferença de peso entre o solo úmido e seco, eles foram denominados como CVA_{TGA} e ADP_{TGA} para se diferenciar dos valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} obtidos por meio das medidas de resistividade, calibradas através de sensores TDR. Neste segundo caso, os valores de CVA são determinados por meio dos sensores do tipo TDR os quais utilizam a constante dielétrica do solo (K), medida através do tempo que ondas eletromagnéticas levam para atravessar uma determinada extensão de solo.

4. RESPIRAÇÃO DO SOLO: FLUXOS DE CO₂ E MEDIDAS AUXILIARES

As determinações dos fluxos de CO₂ do solo foram realizadas usando a técnica de câmara dinâmica, na qual o ar amostrado é recirculado. Quatro câmaras de PVC, com um volume de aproximadamente de 8,7 L cada, foram utilizadas por ponto de medição: P1, P2, P3; totalizando 12 câmaras (Figura 6). As câmaras foram inseridas de forma aleatória até 2 cm de profundidade no solo, 30 minutos antes de começar as medições. A cada ponto de medição as câmaras foram separadas por 4-5 m de distância. As tampas das câmaras foram

conectadas a um analisador de gás infravermelho (IRGA – LiCor 6200) por meio de mangueiras, onde o ar contido na câmara foi bombeado para o IRGA. As calibrações do fluxo *versus* concentração de CO₂ no IRGA foram feitas no mesmo dia da medição, com a utilização de um cilindro de mistura simples de gases, sendo a concentração do padrão de CO₂ de 360 ppm.

Os fluxos de CO₂ do solo foram estimados através do aumento da concentração do gás dentro da câmara, sendo o tempo de acúmulo do gás de 3 minutos. O fluxo de CO₂ foi calculado através de uma regressão linear da relação entre tempo e concentração dentro da câmara, a qual geralmente foi considerada entre 1 e 3 minutos após o fechamento da câmara. As temperaturas do ar interno das câmaras e do solo a 2,5 e 5 cm de profundidade foram medidas usando termopares instalados, ao mesmo tempo em que as medições de CO₂ foram conduzidas, sendo este procedimento realizado cada vez que os fluxos de CO₂ foram coletados. Ao final das medições dos fluxos de CO₂, foi coletada uma amostra de solo por câmara nos primeiros 5 cm de profundidade de solo para determinações do teor gravimétrico de água no laboratório seguindo o procedimento descrito acima. Estes valores de umidade do solo foram usados para corrigir as estimativas de carbono da biomassa microbiana.

Para auxiliar na interpretação dos valores sazonais dos fluxos de CO₂ do solo, foi calculado o déficit de saturação do ar (DSA em kPa). As estimativas do DSA foram feitas a partir de dados de umidade relativa (%) e temperatura (°C) do ar, os quais foram fornecidos pela Embrapa-Cerrados, localizada próxima da área da EEAE. O DSA foi estimado através da seguinte fórmula (Bucci, 2001):

$$\text{DSA (kPa)} = \left[0,61137 * \left(1 - \frac{UR}{100} \right) \right] * \left(\frac{17,502 * T}{240,97 + T} \right)$$

Onde UR (%) e T (°C) são umidade relativa e temperatura do ar, respectivamente

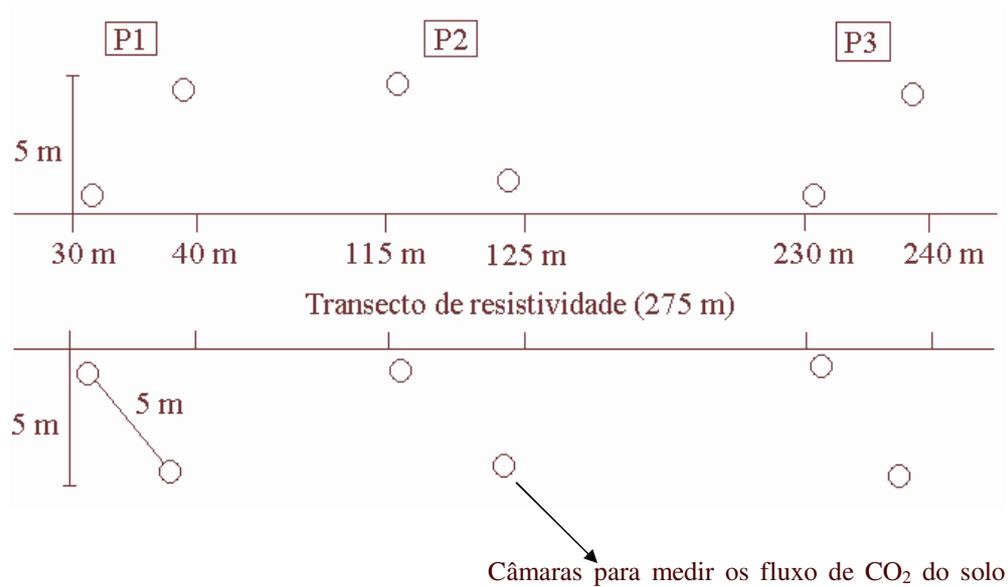


Figura 6. Esquema das medições de fluxos de CO₂ ao longo do transecto de estudo, onde foram colocadas aleatoriamente 12 câmaras (4 por ponto de coleta), espaçadas por cerca de 5 metros, dos dois lados do transecto estabelecido para medir resistividade elétrica do solo.

5. CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO, TAXA DE RESPIRAÇÃO BASAL E EVOLUÇÃO DE CO₂

As amostras de solo para determinações de carbono da biomassa microbiana (CBM) foram coletadas nos primeiros 5 cm de profundidade de solo dentro da área da câmara, logo depois da coleta de CO₂. Um total de 4 amostras de solo por ponto de coleta (P1, P2 e P3) foram misturadas para criar uma amostra composta de solo/ponto de coleta e logo foram transportadas para o laboratório para ser analisadas.

As determinações do carbono da biomassa microbiana foram feitas seguindo o método de clorofórmio fumigação-incubação (CFI) desenvolvido por Jenkinson & Powlson (1976) e posteriormente modificado por Oliveira *et al.* (2001). Um total de 6 subamostras de solo de 20 g cada foram obtidas a partir de cada amostra composta de solo, sendo 3 subamostras/ponto de coleta preparadas para serem fumigadas, enquanto as outras 3

subamostras/ponto de coleta foram incubadas sem fumigação. Para todas as subamostras, a umidade do solo foi corrigida para 100% da capacidade de campo (o que corresponde a 36% de teor de umidade) e, depois deste procedimento, todas as subamostras, não fumigadas (controle) e fumigadas (tratadas), foram deixadas para incubação por um período de 6 dias. Após o 6º dia, foi determinada a quantidade de CO₂ liberado do solo somente nas amostras controle, não destinadas para a fumigação. Para a captura de CO₂ liberado durante o período de incubação, foram colocados dentro dos frascos hermeticamente fechados da incubação, frascos contendo 10mL de uma solução de KOH 0,3 N. A determinação da quantidade de CO₂ capturado nas soluções de KOH foi realizada por meio de titulação com HCl 0,1N usando a fenolftaleína como indicador. Durante o 6º dia do período de incubação, as três subamostras de solo que foram destinadas para a fumigação foram expostas, durante 24 horas, a uma atmosfera de clorofórmio livre de álcool. Após a fumigação com clorofórmio, tanto as amostras fumigadas como as controle, foram deixadas para incubação por um período adicional 10 dias, e frascos contendo novas soluções 10 mL de KOH 0,3 N foram colocados dentro dos frascos da incubação. Ao final deste período, foi determinada a quantidade de CO₂ capturada na solução de KOH 0,3 N e a quantidade de CO₂ liberado foi determinado por meio de titulação com HCl 0,1N como descrito acima.

A quantidade de CO₂ acumulada durante o período da primeira incubação das amostras não fumigadas, foi usada como índice de evolução de CO₂ dos solos. A biomassa microbiana foi estimada pela diferença da quantidade de CO₂ liberado entre amostras de solo não fumigadas e fumigadas durante a segunda incubação. O carbono da biomassa microbiana foi calculado por meio do coeficiente de mineralização $K_c = 0,41$ (Anderson & Domsch, 1978), o qual assume que 41% do C da biomassa microbiana foi mineralizado durante o período de incubação. A taxa de respiração basal da biomassa microbiana (TRB) foi estimada a partir dos dados de evolução de CO₂ e de carbono da biomassa microbiana. Este índice de taxa de biomassa microbiana representa a quantidade de CO₂ que é liberado por unidade de biomassa microbiana em um determinado tempo.

6. DETERMINAÇÃO DE PH DO SOLO

As determinações de pH foram feitas em três subamostras de solo de 10 g cada, obtidas a partir das amostras compostas dos solos coletados para as determinações do

carbono da biomassa microbiana. As amostras foram previamente secas a temperatura ambiente e destorroadas em peneiras com malha de 2 mm. Os valores de pH foram medidos em água e solução de KCl 1N na proporção de 1:2,5.

7. DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA DE RAÍZES

Para a coleta e determinação da biomassa de raízes grossas e finas foram escavadas, em cada ponto de coleta de CO₂, 3 trincheiras de 50 x 50 cm separadas aproximadamente por 5 metros de distância entre si, totalizando 9 trincheiras em todo transecto. As raízes grossas (raízes > 2 mm de diâmetro) foram coletadas manualmente no campo dentro da área da trincheira e agrupadas por intervalo de profundidade: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-30 cm e 30-50 cm. No laboratório, as amostras de raízes grossas foram lavadas para retirar o solo aderido, e em seguida, mantidas em estufa a 60°C até alcançar peso seco constante. O presente estudo considerou como biomassa subterrânea grossa (> 2 mm) as demais estruturas subterrâneas, tais como bulbos, rizomas, xilopódios, tubérculos caulinares e caules subterrâneos. Para os propósitos deste estudo, não foi realizada a separação entre raízes do estrato lenhoso e herbáceo-arbustivo, nem entre raízes vivas e mortas.

Para a estimativa de biomassa subterrânea fina (< 2 mm de diâmetro) entre 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade do solo, retirou-se amostras de 1 kg de solo nesses intervalos de profundidade usando tubos de PVC (cerca de 5 cm de diâmetro) colocados por 11 vezes, de forma aleatória em diferentes pontos da trincheira, para assim cobrir a heterogeneidade local. Para a amostragem de raízes finas entre 10-30, 30-50 cm de profundidade, foi coletado todo o solo contido dentro de um volume de 50 cm x 50 cm x 20 cm de profundidade. Posteriormente no laboratório, as amostras de solo dos intervalos de profundidades 10-30 e 30-50 cm foram manualmente homogeneizadas e as raízes quantificadas a partir de uma subamostra de 1 kg, lavada e passada por uma peneira de malha de 2 mm. Para reter as raízes mais finas, o sobrenadante resultante da lavagem das amostras de solo de 1 kg foi passado em uma peneira de malha fina (0,5 mm) e as raízes finas, separadas de outros materiais, foram retiradas. As amostras de raízes finas foram mantidas em estufa a 60°C até alcançar peso seco constante. A biomassa de raízes finas foi determinada a partir do peso seco das raízes e do peso de cada amostra de solo. Os valores

de densidade aparente do solo foram utilizados para transformar o peso seco do solo em volume.

Para determinar a densidade do solo, foram feitas amostragens do solo nos intervalos de profundidades de 0-5 cm, 10 cm, 20 cm e 40 cm utilizando-se um cilindro de volumétrico de 98,13 cm³, tendo muito cuidado de não compactar o solo coletado. No laboratório, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 72 horas, e finalmente seu peso foi determinado.

8. ANÁLISES DOS DADOS

O programa SYSTAT versão 9.0 para Windows foi utilizado para as análises estatísticas dos dados. Os dados foram transformados, quando necessário, para atender aos pré-requisitos de independência de variância e normalidade. Análises de variância (ANOVA) com medidas repetidas foram realizadas para comparações dos dados de resistividade, CVA_{RES} e CVA_{TGA} , ADP_{RES} e ADP_{TGA} , fluxos de CO₂, carbono da biomassa microbiana, evolução de CO₂ e taxa de respiração basal. Para comparar as diferenças entre os meses de estudo, os dados de resistividade, CVA e ADP extraídos dos 3 pontos de coleta foram considerados repetições em um mesmo mês, sendo que por este motivo não foi possível a comparação entre os pontos de coleta para estas variáveis. As variáveis carbono da biomassa microbiana, evolução de CO₂ e taxa de respiração basal não tiveram repetições, uma vez que as repetições foram analíticas, ou seja, provenientes de medições a partir de amostras de solo homogeneizadas no laboratório. Entretanto, houve repetições das medidas de fluxo de CO₂ por mês e nos 3 pontos de coleta, o que permitiu a comparação entre os pontos de coleta e os meses de estudo. Posteriormente foram feitas análises de variância e análises *a posteriori* (teste de Tukey) para testar as diferenças entre os meses de estudo.

As análises com medidas repetidas também foram aplicadas para verificar o efeito da profundidade, o efeito dos pontos de coleta e o efeito da interação profundidade e ponto sobre a biomassa de raízes grossas e finas. Na análise, os pontos de coleta foram considerados como tratamentos e as profundidades, medidas repetidas. A interação profundidade e ponto de coleta testa a hipótese do paralelismo, se a distribuição da biomassa de raízes grossas e finas ao longo das profundidades estudadas difere entre os

pontos (Ende, 1993). Dentro deste contexto duas opções de análise paramétrica são possíveis: univariada, ANOVA, ou multivariada, MANOVA (Ende, 1993). Neste estudo, os dados foram analisados através da ANOVA, pois além de ser mais robusta, os dados foram coletados em profundidades adjacentes e permitem "circularidade", ou seja, os dados são mais correlacionados que aqueles coletados em profundidades distantes.

Regressões lineares foram realizadas para avaliar as duas metodologias utilizadas nos cálculos de CVA e ADP (método gravimétrico e resistividade), e para avaliar o efeito da ADP_{RES} , de 0 a 50 cm de profundidade do solo, sobre os fluxos de CO_2 do solo. Para todas as análises estatísticas descritas acima, foram consideradas significativas as diferenças a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

RESULTADOS

VARIAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DA RESISTIVIDADE

O efeito do padrão sazonal da precipitação (Figura 7a) e a heterogeneidade do ambiente subterrâneo podem ser claramente observados nos perfis bidimensionais da resistividade obtidos ao longo dos meses de medição no ano de 2005 (Figuras 8-11). Como esperado, as zonas de maior resistividade foram sempre observadas ao longo dos primeiros 4 m de profundidade do solo, que representam as baixas condições de condutividade associadas a alta evapotranspiração característica das savanas tropicais. Dentro destes primeiros 2 m de profundidade, os máximos valores de resistividade ocorreram no mês de novembro (18.382 $\Omega.m$ no P2 a 0 cm de profundidade do solo), para o qual ocorreu maior distribuição das cores vermelhas ao longo da superfície do solo. Ao longo de todos os perfis mensais observou-se claramente uma região de baixa resistividade ou alta condutividade, que começa a partir de uma profundidade de solo de cerca de 7 m, a qual

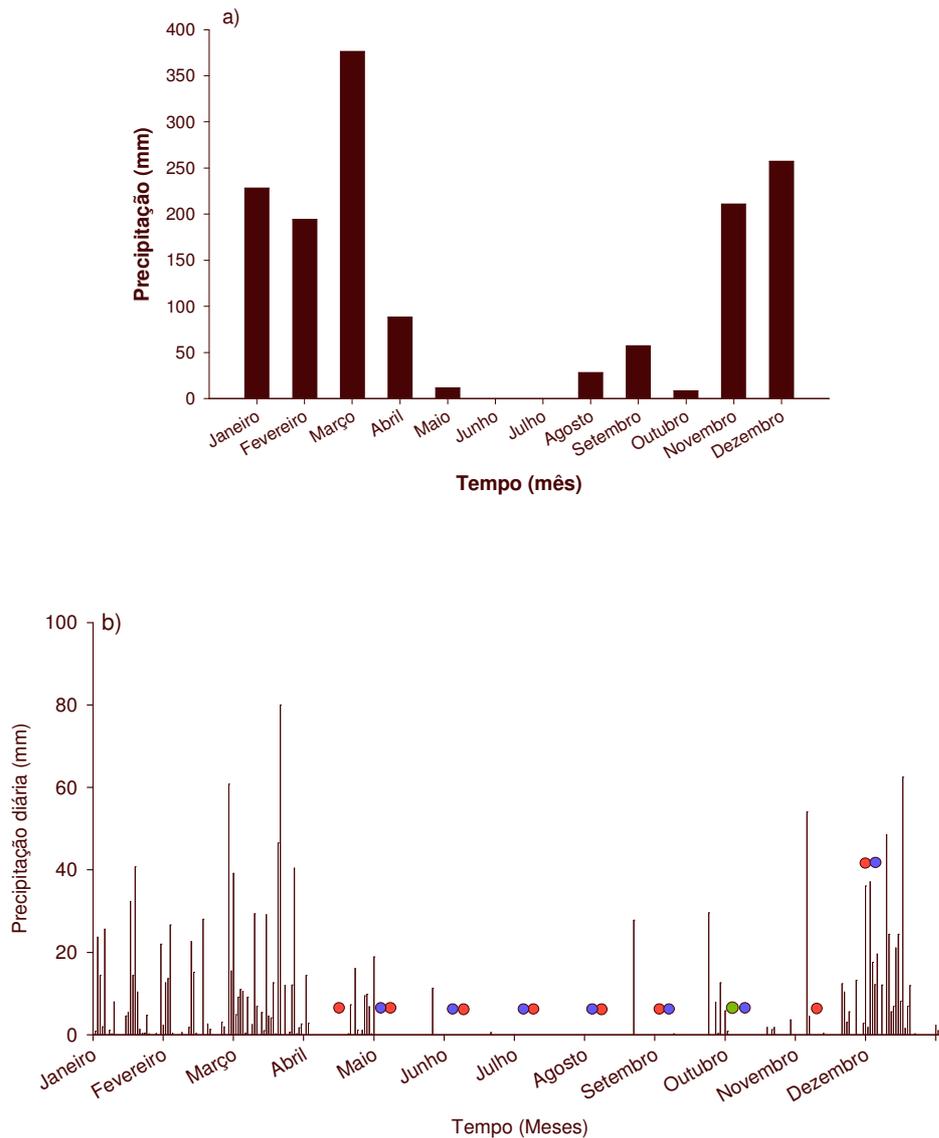
define uma zona de condições de saturação permanente de água, já descrita por Garcia-Montiel *et al.* (submetido) para o mesmo perfil. É interessante mencionar que o conteúdo de água presente na zona de saturação permanente abaixo de 7 m, não alcança a zona acima, que se caracteriza por manter boas condições de aeração do solo. A região de saturação permanente representa a presença de lençol freático que está suspenso sobre um material impermeável, composto, provavelmente por saprolito juntamente com material

parental (Figuras 8-11, cores verdes no centro dos perfis). A figura 12 mostra as mudanças dos valores absolutos de resistividade das camadas superficiais (< 200 cm de profundidade) do solo, extraídos a partir dos perfis bidimensionais da resistividade. Os valores médios mensais de resistividade variaram entre 2.626 Ω .m, valor encontrado a 200 cm de profundidade no P1 no mês de maio (início da estação seca) até 18.382 Ω .m, valor encontrado a 0 cm de profundidade no P2 no mês de novembro (início da estação chuvosa).

De forma geral, os maiores valores da resistividade foram obtidos nos primeiros centímetros de profundidade do solo (0-30cm) o que está em acordo com o observado nos perfis 2D de resistividade (Figuras 8-11). A variação vertical, ao longo das profundidades amostradas, dos valores de resistividade mostrou uma tendência de decréscimo dos mesmos com o aumento da profundidade do solo (até 200 cm de profundidade) ao longo dos meses,

porém tais tendências nos padrões da resistividade não foram estatisticamente significativas ($p>0,05$).

Figura 7. a) Precipitação mensal (mm) e b) precipitação diária registrada na estação



Chapada da Embrapa Cerrados, ($15^{\circ}35'30''$ S, $47^{\circ}42'30''$ W), entre janeiro e dezembro de 2005, dias de coleta de ● resistividade, ● fluxos de CO₂ e ● somente de CVA_{TGA}.

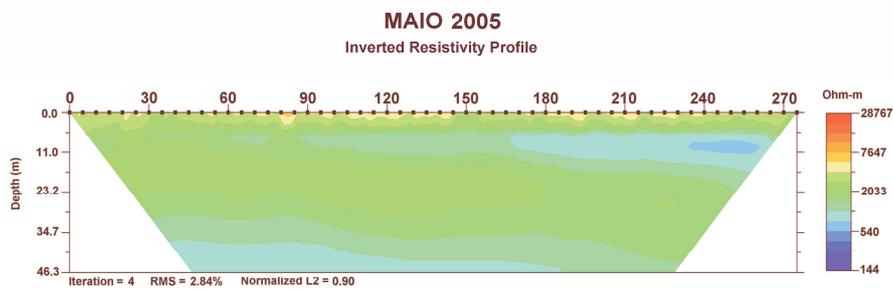
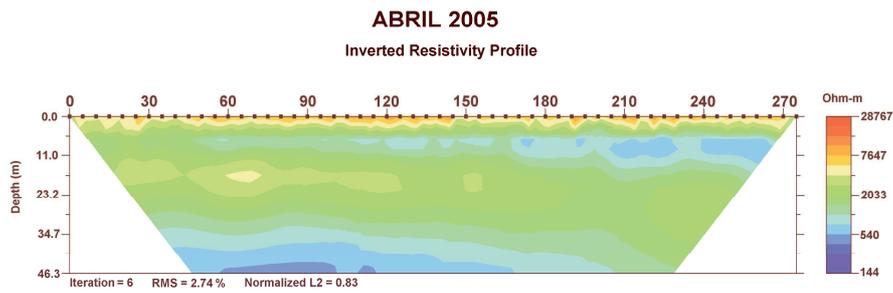


Figura 8. Perfis bidimensionais de resistividade (Ω .m) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre abril e maio de 2005.

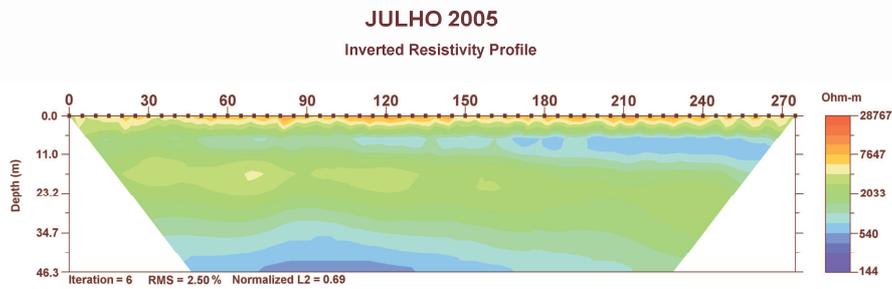
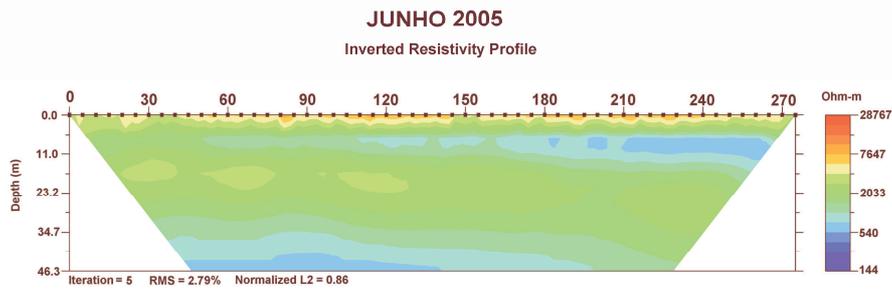


Figura 9. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre junho e julho de 2005.

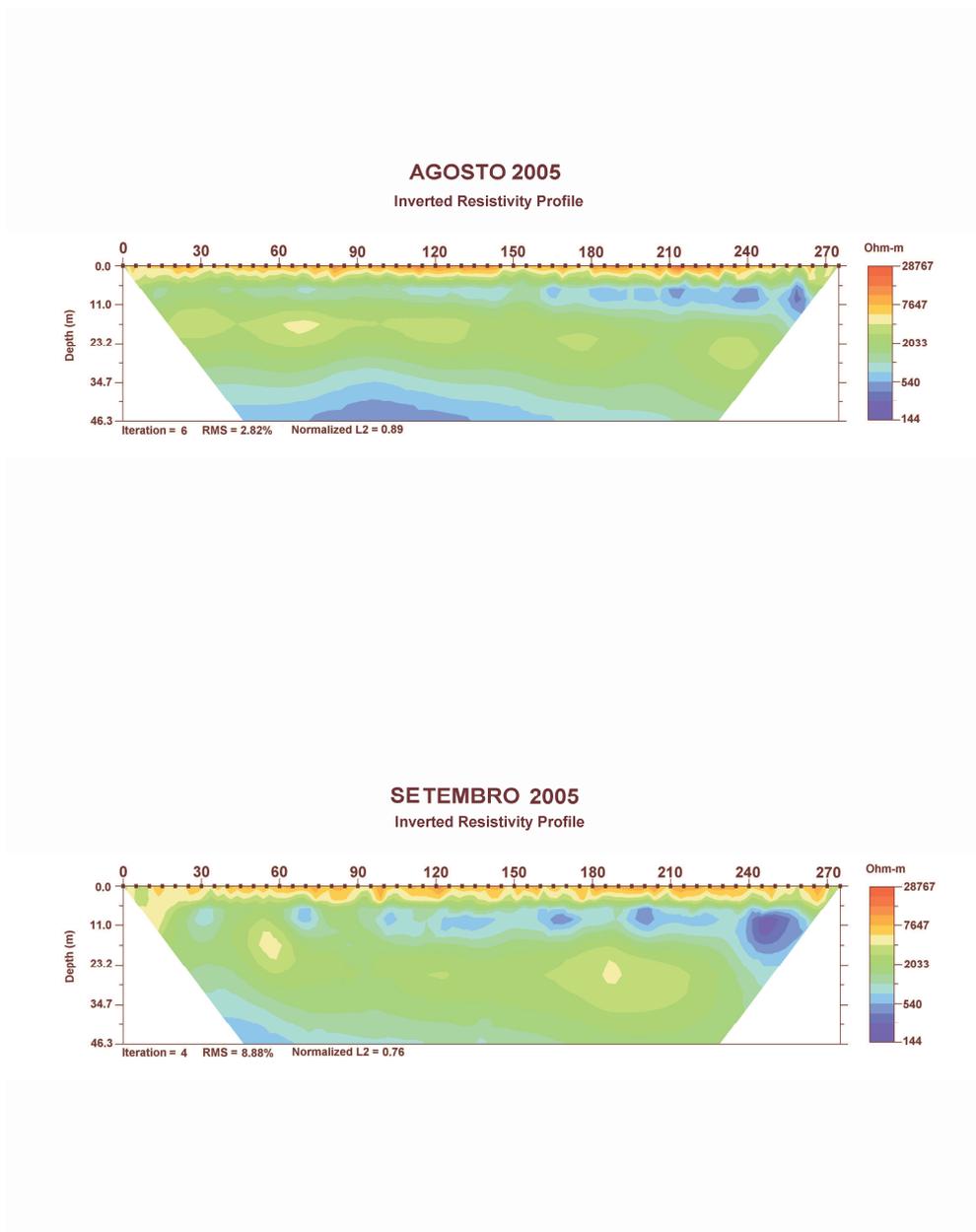


Figura 10. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre agosto e setembro de 2005.

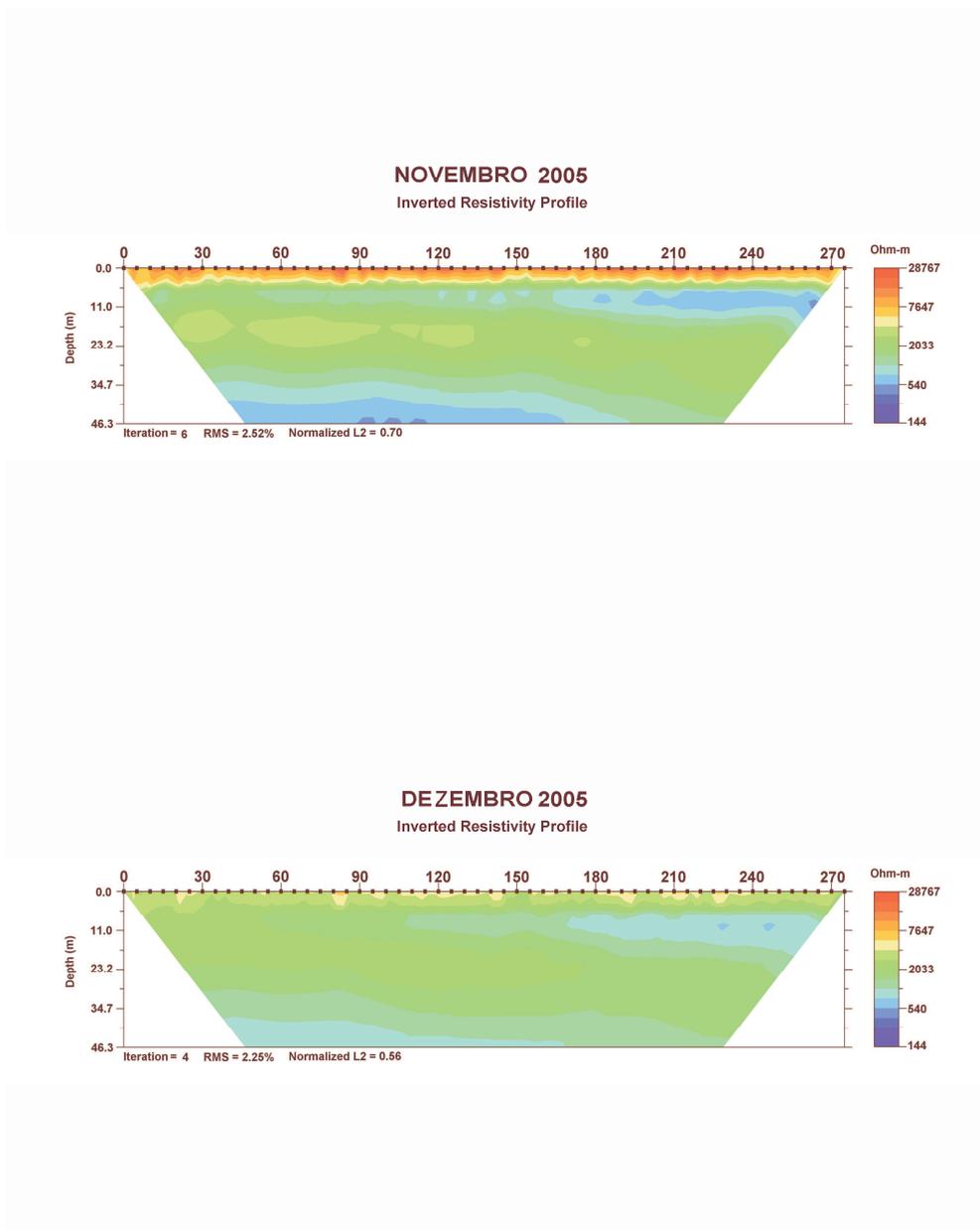


Figura 11. Perfis bidimensionais de resistividade ($\Omega.m$) mensais obtidos a partir de um transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As medições foram feitas entre novembro e dezembro de 2005.

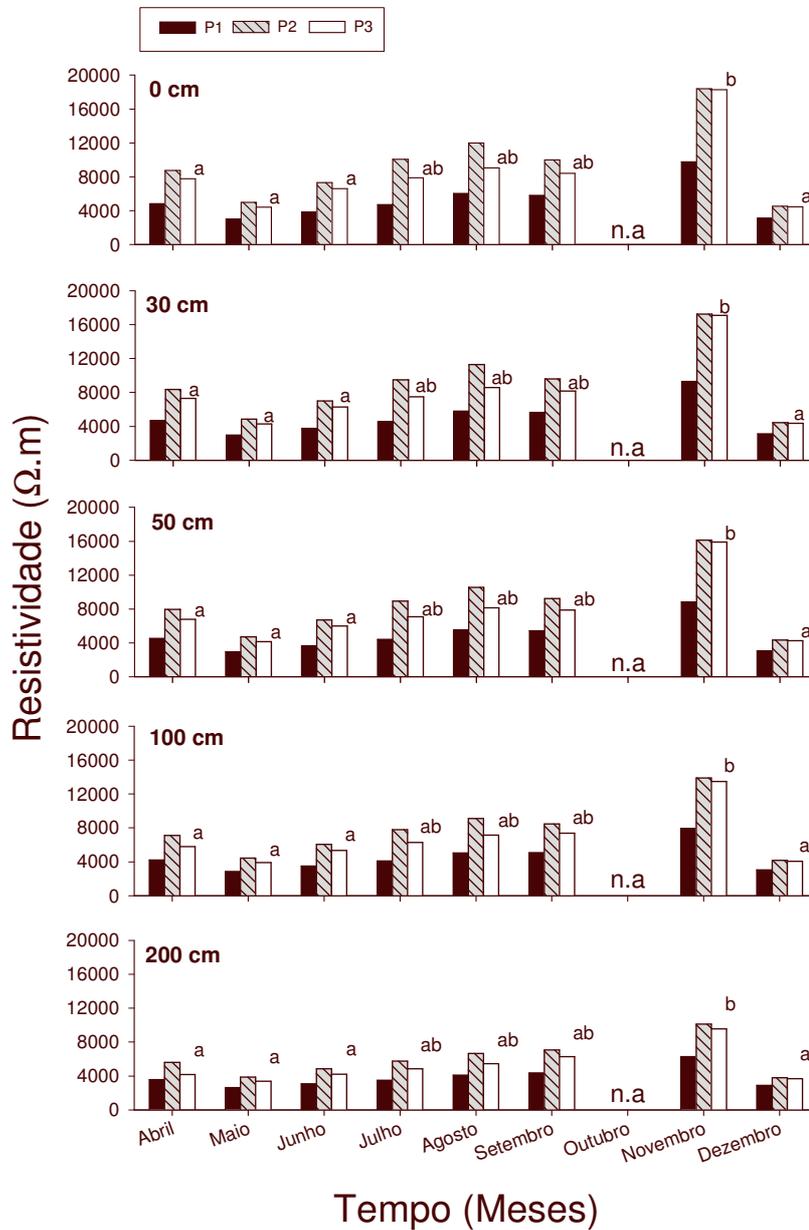


Figura 12. Valores médios de resistividade dos solos ($\Omega.m$) medidos em 3 pontos de coleta localizados ao longo do transecto de 275 m de comprimento em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, nas profundidades de solo de 0, 30, 50, 100 e 200 cm, obtidos entre abril e dezembro de 2005. Letras diferentes representam valores significativamente diferentes ($p < 0,05$) entre meses amostrados. n.a.: não aplicado.

Os padrões da resistividade observados para os três pontos de coleta (0-200 cm) mostraram que o P1 apresentou uma tendência a menores valores de resistividade tanto em relação às medições mensais quanto de profundidade do solo (Figura 12). Os menores valores de resistividade no P1, comparados aos dos outros dois pontos (P2 e P3), claramente indicaram uma tendência às condições de maior condutividade associadas às camadas superficiais (0-200 cm) do solo próximas ao ponto P1. Ao contrário do P1, o P2 apresentou os maiores valores de resistividade tanto mensais quanto de profundidade do solo (Figura 12).

Os padrões da resistividade ao longo dos meses mostraram que, os menores valores de resistividade foram obtidos no mês de maio (início da estação seca) e em dezembro, logo após o início da estação chuvosa (Figura 12). O mês de novembro apresentou os maiores valores da resistividade independentemente do ponto de coleta. Entretanto, houve um rápido declínio dos valores de resistividade com o maior índice de precipitação no mês de dezembro (Figura 7b), o qual apresentou valores de resistividade 2 vezes menores em relação à novembro e mais similares àqueles observados durante os meses chuvosos. Esta tendência do efeito da sazonalidade foi consistente para todos os pontos de coleta e ao longo das profundidades, mas devido ao fato de que o efeito diminui com o decréscimo da profundidade, a interação entre resistividade ao longo dos meses e profundidade do solo também foi significativa ($p < 0,01$).

CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA AS PLANTAS

As tendências nos valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} até 200 cm de profundidade são mostradas nas figuras 13 e 14 através das barras. Os valores médios mensais de CVA_{RES} e ADP_{RES} variaram entre 16,6% e 19,7 mm, respectivamente (encontrados a 0-50 cm de profundidade no P2 no mês de novembro), até valores de 26,8% e 135,8 mm, respectivamente (encontrados a 100-200 cm de profundidade no P1 no mês de maio). As tendências nos valores médios mensais de CVA_{TGA} e ADP_{TGA} até 200 cm de profundidade são mostradas nas mesmas figuras 13 e 14 através dos símbolos. Estes valores médios variaram entre 15,2% e 20,7 mm (P2 entre 0-50 cm de profundidade no mês de agosto) até 30,1% e 168,4 mm (P2 entre 100-200 cm de profundidade no mês de dezembro). Como consequência da tendência de decréscimo da resistividade com o aumento da profundidade

do solo (Figura 12), todos os valores de CVA e ADP (tanto aqueles calculados por meio da resistividade como de TGA) mostraram uma tendência de acréscimo ao longo do mesmo perfil do solo, sendo que tais tendências foram significativas para as variáveis CVA_{TGA} , ADP_{RES} e ADP_{TGA} ($p < 0,01$).

Em relação aos pontos de medição, o P1 apresentou os maiores valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} observados para os três pontos de coleta (0-200 cm), tanto em termos das medidas mensais, como de profundidade do solo (Figuras 13 e 14). Entretanto, essa tendência não foi observada para os valores de água do solo obtidos por meio das medições diretas de teor gravimétrico de água (CVA_{TGA} e ADP_{TGA} , símbolos nas Figuras 13 e 14). O P2 apresentou os menores valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} , exceto nos meses de novembro e dezembro, quando os valores destes parâmetros no P2 foram similares aos valores do P3 em todas as profundidades (Figuras 13 e 14).

O efeito da sazonalidade nos valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} foi altamente significativo, assim como a interação da sazonalidade com a profundidade do solo ($p < 0,01$), mostrando assim tendências similares àquelas observadas na resistividade. Os menores valores de resistividade observados no início da estação seca e logo após o início da estação chuvosa (Figura 12) foram acompanhados por maiores valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} observados durante estes períodos (barras nas Figuras 13 e 14). Os valores de CVA_{TGA} e ADP_{TGA} apresentaram tendências similares àquelas observadas nos valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} (símbolos nas Figuras 13 e 14). Os menores valores de CVA_{RES} e ADP_{RES} foram encontrados durante o mês de novembro o qual representa o final do período seco. É interessante notar que a precipitação, entre meados de novembro (16/11) e a data de coleta de dados em dezembro, a qual somou 184 mm (Figura 7b), causou um rápido aumento da ADP_{RES} estimada nestes primeiros 200 cm de profundidade do solo, o que significou um acréscimo de até 3 vezes nos valores de ADP_{RES} durante o mês de dezembro em relação ao mês de novembro. De fato a quantidade de ADP encontrada durante o mês de dezembro alcançou valores similares àqueles observados para os meses da estação chuvosa (Figura 14).

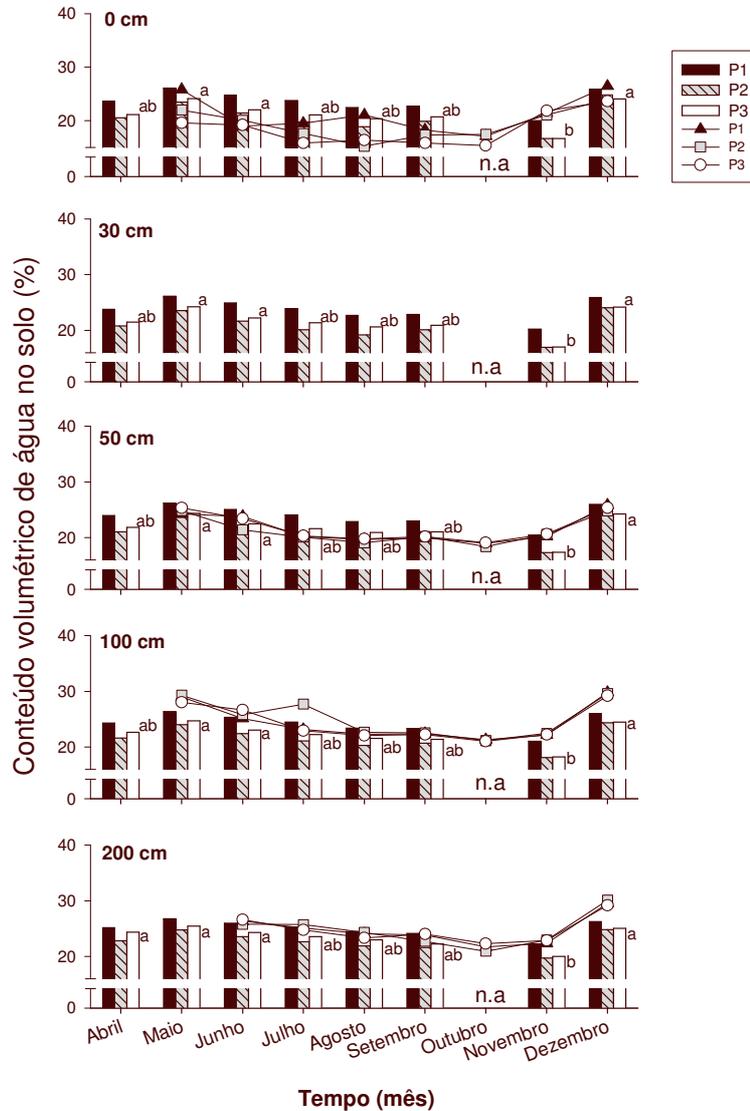


Figura 13. Valores médios de conteúdo volumétrico de água (CVA %) no solo em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, nas profundidades de solo de 0, 30, 50, 100 e 200 cm, obtidos entre abril e dezembro de 2005. As barras representam valores médios de CVA medido por resistividade e os símbolos representam o CVA medido pelo método gravimétrico (TGA). As letras diferentes, para o gráfico de barras, representam valores significativamente diferentes ($p < 0,05$) entre os meses amostrados. n.a.: não aplicado.

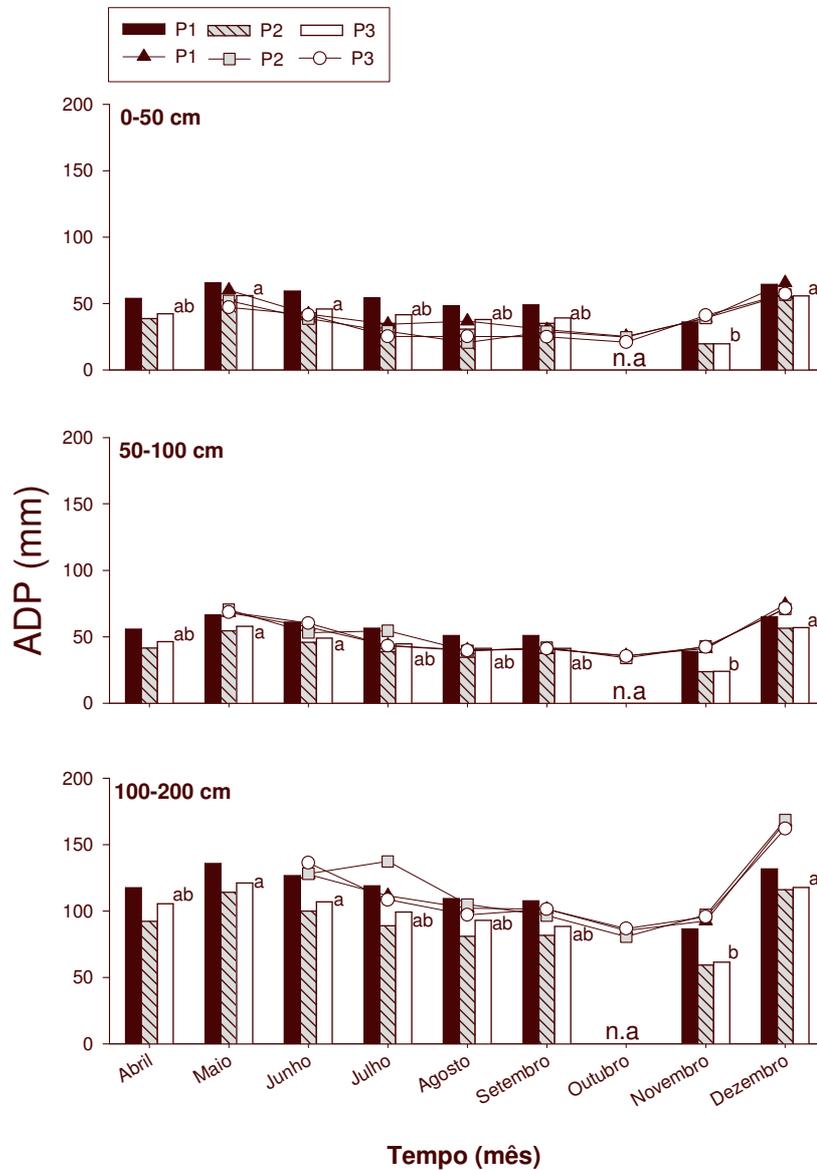


Figura 14. Valores de água disponível para as plantas (ADP mm) obtida em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Emendadas, Planaltina, DF, nos intervalos de profundidade 0-50 cm, 50-100 cm e 100-200 cm, obtidos entre abril e dezembro de 2005. As barras representam valores médios de ADP medido por resistividade e os símbolos representam o ADP medido pelo método gravimétrico (TGA). As letras diferentes, para o gráfico de barras, representam valores significativamente diferentes ($p < 0,05$) entre os meses amostrados. n.a.: não aplicado.

As comparações dos valores de CVA e ADP obtidos por meio do método gravimétrico e aqueles obtidos por meio de calibrações da resistividade com TDR são apresentadas nas Figuras 15a e 15b. Nas camadas superficiais do solo, entre 0 e 50 cm, a maior parte dos valores se encontra acima da linha 1:1, o que sugere que houve uma tendência a menores valores de CVA_{TGA} em comparação aos valores de CVA_{RES} . Enquanto que nas profundidades do solo de 100 e 200 cm este padrão foi invertido. A relação entre ADP_{RES} e ADP_{TGA} mostrou tendências similares àquelas observadas para a relação entre os dois métodos de estimativa do CVA, mas com um R^2 mais alto ($R^2=0,827$, $p<0,05$).

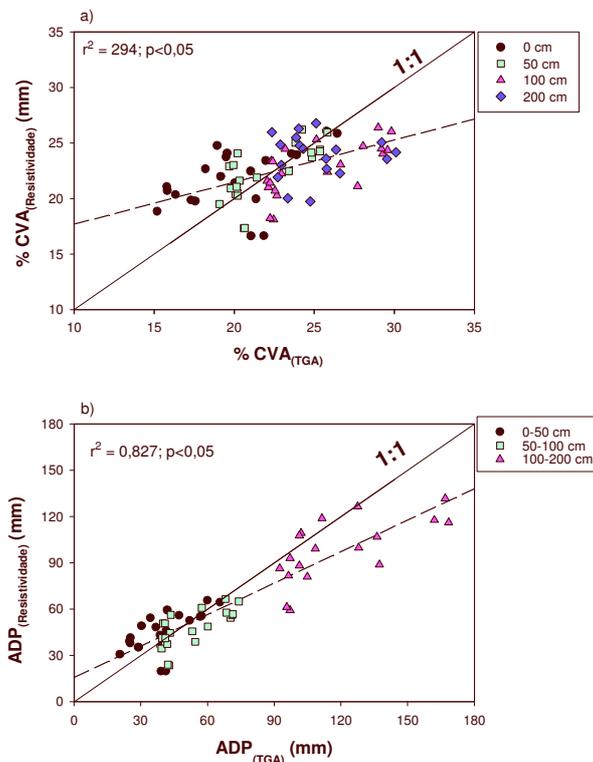


Figura 15. a) Relação entre os valores de conteúdo volumétrico de água (CVA %) estimados pelos métodos de resistividade (CVA_{RES}) e gravimétrico (CVA_{TGA}), b) Relação entre os valores de água disponível para as plantas (ADP mm) estimados pelos métodos de resistividade (ADP_{RES}) e gravimétrico (ADP_{TGA}). As linhas representam as regressões lineares: linha descontinua as regressões obtidas e linha contínua 1:1 para permitir a comparação como se o $R^2 = 1,0$.

FLUXOS DE CO₂ DO SOLO

Os valores totais dos fluxos de CO₂ do solo (Figura 16) encontrados para o período de estudo foram 56,7 (P1), 52,4 (P2) e 51,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (P3). As análises de variância com medidas repetidas no tempo usando o ponto de coleta como fator agrupador, indicaram que o ponto de coleta teve um efeito marginalmente significativo nos fluxos de CO₂ do solo ($p=0,052$). Houve uma tendência de maior valor médio dos fluxos de CO₂ do solo no P1, em relação aos P2 e P3 (Figura 16). Ao contrário, os meses de coleta tiveram um efeito altamente significativo ($p<0,01$) sobre os valores de fluxo de CO₂ do solo (Figura 17a). Por outro lado, a interação entre os pontos de coleta e fluxo sazonal de CO₂ do solo, não foi significativa ($p>0,1$). Os maiores fluxos de CO₂ foram observados durante o mês de maio (valor máximo de 4,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ encontrado no P1), sendo estes significativamente diferente dos outros meses de estudo ($p<0,05$) (Figura 17a). Estes maiores valores dos fluxos de CO₂ durante o mês de maio acompanharam os altos valores do conteúdo volumétrico de água no solo determinado no dia da resistividade (Figura 13) ou dentro da câmara no mesmo dia das medições de fluxos de CO₂ (Figura 17a). Por outro lado, o mês de setembro apresentou os menores valores de fluxo de CO₂ do solo (valor mínimo de 0,9 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ no P2) sendo também significativamente diferente dos outros meses de estudo ($p<0,05$) e relacionado à um menor CVA_{TGA} (Figura 17a). Os fluxos de CO₂ do solo apresentaram um pequeno aumento durante o mês de outubro, após as primeiras chuvas que ocorreram em setembro (Figura 7b). Entretanto, no mês de dezembro foi observado um aumento significativo no CVA_{TGA}, o qual não foi acompanhado de um aumento semelhante nos fluxos de CO₂ do solo (valor máximo de 2,3 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ encontrado no P1).

Os valores médios de déficit de saturação do ar (Figura 17b) variaram entre -0,19 no mês de março e -1,66 kPa no mês de outubro. Os valores médios DSA aumentaram a partir de abril, atingindo o máximo em outubro, e diminuíram em novembro. O Anexo 2 apresenta os dados de temperatura do solo e das câmaras. A temperatura do solo a 2,5 cm de profundidade variou entre 20°C no mês agosto e 35°C no mês de outubro. Valores um pouco menores da temperatura do solo foram observados a 5 cm de profundidade sendo de 19°C no mês agosto e 33°C no mês outubro. A temperatura do ar dentro das câmaras variou entre 26°C (meses de agosto e dezembro) e 42°C (no mês de outubro).

A relação entre ADP_{RES} (0-50 cm) e fluxos de CO_2 do solo é apresentada na figura 18. Houve uma tendência de aumento dos fluxos de CO_2 do solo à medida em que aumentou a disponibilidade de água para as plantas (ADP_{RES}), embora o valor de R^2 obtido da regressão linear entre ADP_{RES} e fluxos de CO_2 do solo não tenha sido alto ($R^2 = 0,292$; $p < 0,05$).

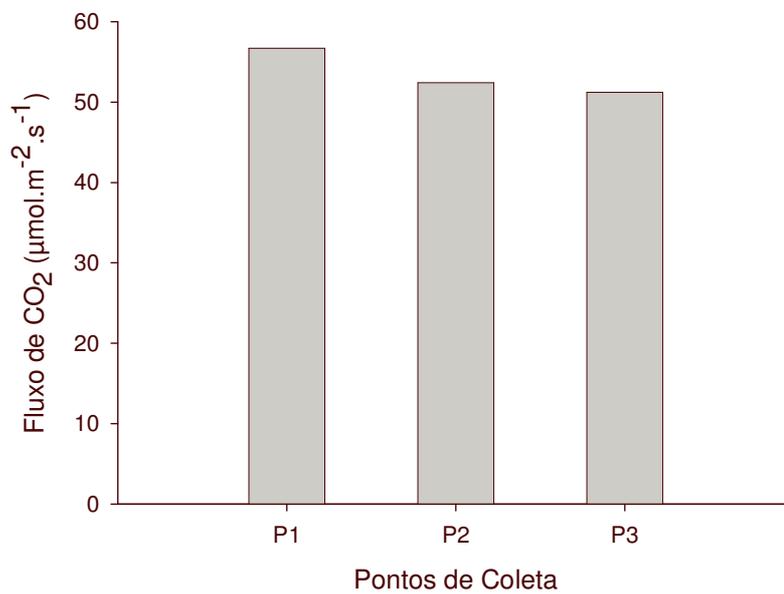


Figura 16. Fluxos totais de CO_2 do solo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), medidos em 3 pontos de coleta entre maio e dezembro de 2005, ao longo de um transecto de 275 m, em uma área de cerrado denso, localizada na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF.

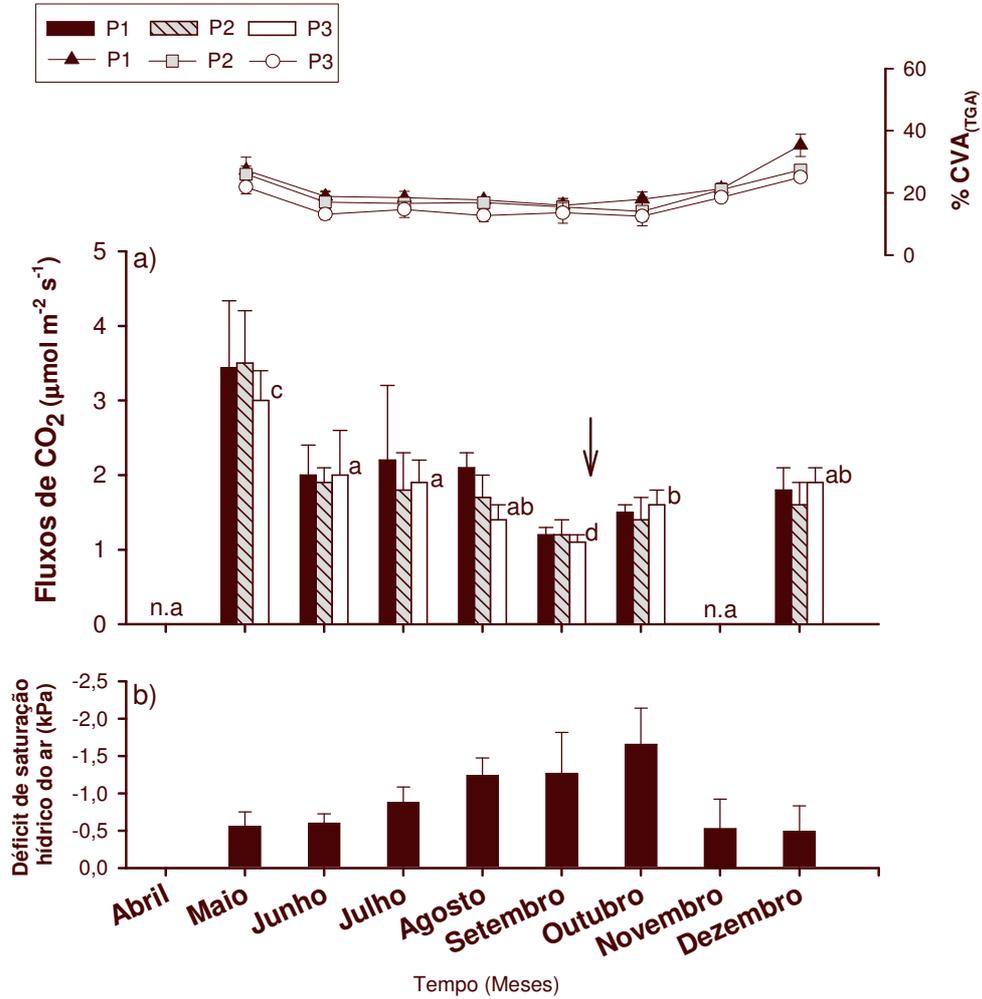


Figura 17. a) Fluxos de CO₂ do solo (μmol.m⁻².s⁻¹), medidos em 3 pontos de coleta, ao longo de um transecto de 275 m, em uma área de cerrado denso, localizada na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005. Os símbolos representam o conteúdo volumétrico de água (CVA %) determinados pelo método gravimétrico, entre 0 e 5 cm de profundidade do solo, obtidos no mesmo dia das medições de fluxos de CO₂ do solo, a seta indica a ocorrência das primeiras chuvas, b) Déficit de saturação do ar (DSA kPa). Fonte dos dados de temperatura e umidade relativa do ar EMBRAPA-CPAC, Planaltina, DF. Letras diferentes representam meses para os quais foram encontrados valores significativamente diferentes (p<0,05). n.a.: não aplicado.

Supprimé : ¶

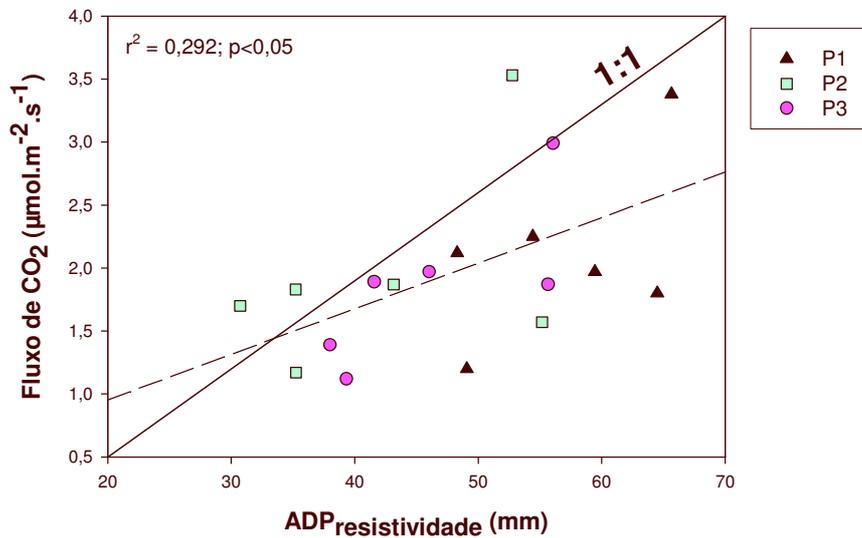


Figura 18. Fluxos de CO₂ do solo (µmol.m⁻².s⁻¹) em função da água disponível para as plantas (mm) – ADP_{RES} – entre 0 e 50 cm de profundidade do solo, obtidos em 3 pontos de coleta em um cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.

CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO, TAXA DE RESPIRAÇÃO BASAL E EVOLUÇÃO DE CO₂

Os valores médios de carbono da biomassa microbiana do solo (Figura 19a), entre 0 e 5 cm de profundidade, variaram entre 279,5 mg C.kg⁻¹ de solo no mês de novembro (P2) e 746,5 mg C.kg⁻¹ de solo no mês de agosto (P1). As análises de variância com repetição no tempo indicaram que houve efeito significativo dos meses nos valores de CBM, evolução de CO₂ e TRB (p<0,01). Os valores de CBM aumentaram a partir do mês de agosto (estação seca) e diminuíram a partir de novembro (estação chuvosa). Entretanto, o padrão do efeito da sazonalidade para CBM foi inverso ao observado nos fluxos de CO₂ e evolução de CO₂ (Tabela 2), determinada durante a incubação dos solos. O pH do solo não apresentou variação importante durante o período de estudo, sendo que os valores de pH em água variaram entre 3,5 e 4,3 e em KCl entre 3,8 e 4,1 (Anexo 1).

Os valores médios de evolução de CO_2 do solo (Tabela 2) variaram entre 113 mg C.kg^{-1} de solo no mês de setembro (P3) e 304 mg C.kg^{-1} de solo no mês de maio (P2). Os valores de evolução de CO_2 diminuíram a partir de maio (início da estação seca) e aumentaram novamente em dezembro (Tabela 2). A TRB variou entre $1,1 \text{ g CO}_2.\text{h}^{-1} \cdot \text{CBM}$ no mês de setembro (P3) e $4,0 \text{ g CO}_2.\text{h}^{-1} \cdot \text{CBM}$ no mês de dezembro (P1) (Figura 19b). Os valores de TRB diminuíram a partir de julho (seca) e aumentaram novamente em novembro.

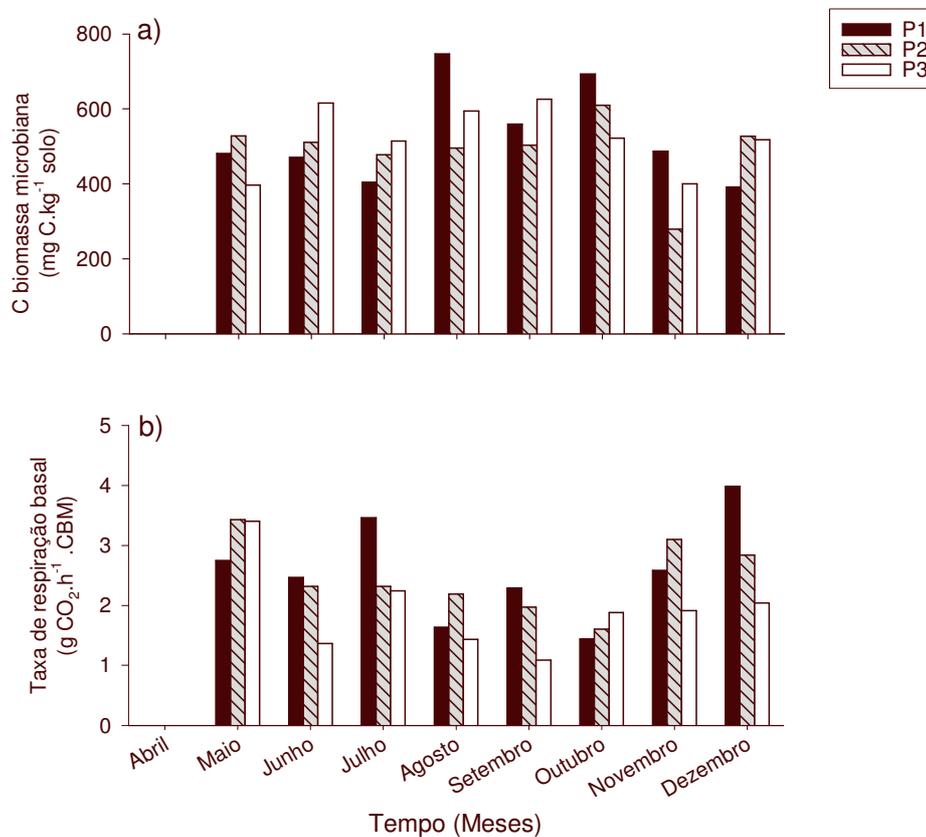


Figura 19. a) Carbono da biomassa microbiana do solo (mg C.kg^{-1} solo), b) taxa de respiração basal da biomassa microbiana ($\text{g CO}_2.\text{h}^{-1} \cdot \text{CBM}$), no intervalo de profundidade de 0 a 5 cm do solo, em um cerrado denso na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.

Tabela 2. Evolução de CO₂ de solo incubado (mg C.kg⁻¹ solo) no intervalo de profundidade de 0 a 5 cm do solo, em um cerrado denso na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.

Meses	Pontos	Evolução de CO ₂ do solo
Maio	1	218
	2	304
	3	224
Junho	1	190
	2	199
	3	139
Julho	1	225
	2	185
	3	188
Agosto	1	204
	2	182
	3	142
Setembro	1	216
	2	163
	3	113
Outubro	1	162
	2	164
	3	162
Novembro	1	197
	2	142
	3	128
Dezembro	1	261
	2	234
	3	168

DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA SUBTERRÂNEA

A biomassa total de raízes grossas até 50 cm de profundidade do solo foi de 19,38 no P1; 8,79 no P2 e 5,22 kg.m³ no P3. A figura 20 mostra os valores médios de biomassa de raízes grossas e finas, e a distribuição das mesmas em porcentagem ao longo das profundidades de solo. Os pontos de coleta divergiram quanto à profundidade na qual se encontrou a maior porcentagem de biomassa de raízes grossas. Os P1 e P2 apresentaram uma redução na contribuição relativa (percentual) da biomassa de raízes grossas com a profundidade amostrada, em contraste com o P3. O P1 apresentou 76% de biomassa de raízes grossas entre 0-10 cm e 2,8% entre 30-50 cm de profundidade, enquanto o P3 apresentou 28% das raízes grossas entre 0-10 cm e 47% entre 30-50 cm de profundidade (Figura 20). Houve efeito significativo do ponto de coleta sobre os valores de biomassa de raízes grossas ($p < 0,05$), não houve efeito significativo das profundidades de solo amostradas, nem interação entre profundidade e ponto de coleta. A ausência de interação entre profundidade e ponto de coleta indica que a distribuição da biomassa de raízes grossas ao longo das profundidades não foi diferente significativamente.

A biomassa total de raízes finas encontrada até 50 cm foi de 2,56 no P1; 2,72 no P2 e 3,18 kg.m³ no P3 (Figura 20). O P3 apresentou os maiores valores médios de biomassa de raízes finas em todas as profundidades, exceto entre 0-5 cm de profundidade do solo. O P1 e P2 tiveram valores médios similares de 2,1 kg.m³ entre 0-5 cm de profundidade. Entre 0 e 5 cm de profundidade do solo P1 e P2 apresentaram a maior contribuição relativa (porcentagem) de raízes finas, enquanto que o P3 mostrou a menor contribuição relativa (20,3%). As profundidades do solo amostradas tiveram efeito significativo nos valores de biomassa de raízes finas ($p < 0,05$), entretanto não houve efeito do ponto de coleta, enquanto houve interação significativa entre profundidade e pontos de coleta ($p < 0,05$).

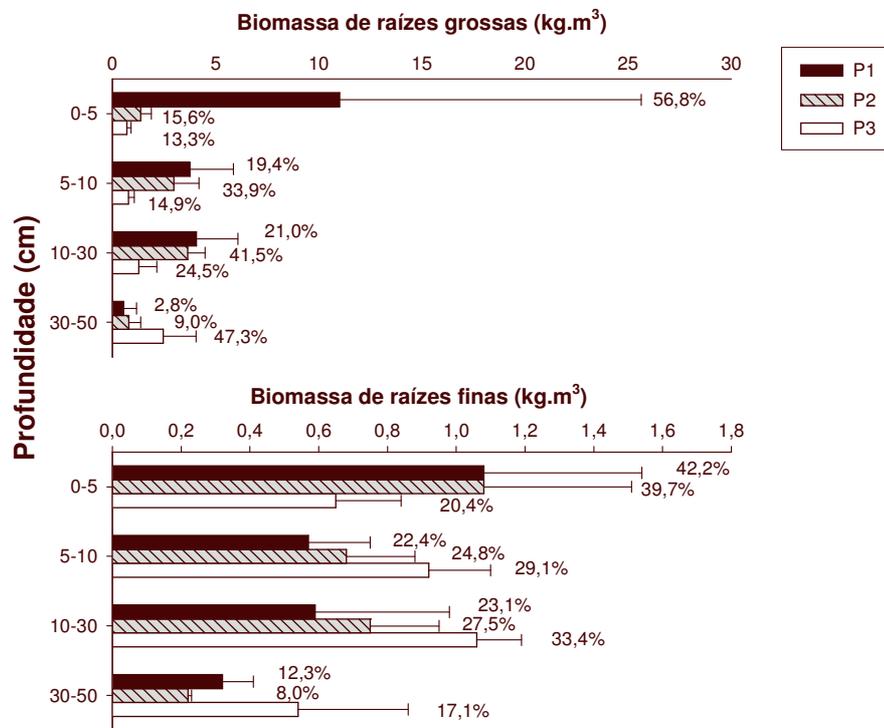


Figura 20. Biomassa de raízes grossas e finas (kg.m³) em uma área de cerrado denso, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. As barras horizontais representam os desvios padrão.

DISCUSSÃO

VARIAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS DA RESISTIVIDADE, CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA E DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA AS PLANTAS

Importantes diferenças espaciais foram observadas, tanto nos valores de resistividade como de CVA e ADP. Os menores valores de resistividade e maiores valores de CVA e ADP observados no ponto P1 até 200 cm de profundidade estão associados à área do transecto, onde os perfis 2D de resistividade mostram que a disponibilidade de água armazenada abaixo de 4 m parece diminuir no P1 em comparação aos pontos P2 e P3. As estimativas de ADP são obtidas como a diferença entre a quantidade de água presente em um determinado período e em um período posterior, a qual assume que a ADP é aquela quantidade de água que está ausente ao final do período analisado. Devido a maior densidade de plantas do estrato arbóreo (Ferreira, 2006) e da biomassa de raízes (30-50 cm) no ponto P3, em comparação aos outros pontos, era esperada maior quantidade de ADP absorvida nas áreas do P3. Desta forma, pode ser que as maiores reduções da ADP, as quais foram observadas nos pontos P2 e P3, seja o resultado de um processo em potencial: ascensão da água presente em maior profundidade por capilaridade e, em consequência disto, maior uso de água pelas plantas (em P2 e P3) dos reservatórios profundos de água.

O transecto amostrado neste estudo apresentou um componente marcadamente espacial. Estudos prévios (Ferreira, 2006) demonstraram que aquelas áreas com maior ADP nas camadas mais profundas do solo (~400 cm) também apresentaram maior densidade arbórea (P2 e P3), o que sugere uma associação entre alta densidade de plantas em áreas com maior ADP. Uma maior densidade de plantas, arbustos e árvores, em áreas com maior ADP em camadas mais profundas sugere uma maior quantidade de água absorvida e provavelmente maior densidade de raízes profundas (Bezerra *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2005). Os resultados destes estudos indicam que a presença de sistemas radiculares profundos pode contribuir significativamente para o balanço hídrico do Cerrado, pois a água absorvida em grandes profundidades do solo retorna para a atmosfera por meio da transpiração das plantas do estrato arbóreo. Assim, a presença de raízes profundas é mais importante para o ciclo do C e água em ecossistemas sujeitos as secas sazonais (Nepstad *et al.*, 1994; Hodnett *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 1996; Hoffman & Jackson, 2000).

A dinâmica do armazenamento de água no solo do cerrado estudado, demonstrada através das mudanças observadas nos perfis 2D de resistividade, é claramente sazonal. Tal efeito é especialmente marcado nas camadas superficiais do solo (< 200 cm), como esperado em áreas de savanas tropicais, caracterizadas por apresentar uma alta evapotranspiração (Franco, 2002). Estes resultados concordam com outros estudos, também conduzidos em áreas de cerrado, os quais demonstraram que durante a estação seca, a disponibilidade de água para as plantas diminui drasticamente nos três primeiros metros do solo (Rawistcher, 1948; Quesada *et al.*, 2004, Bezerra *et al.* 2005 e Oliveira *et al.* 2005). Em contraste com estudos anteriores, o uso da técnica de perfis bidimensionais de resistividade deste estudo permitiu demonstrar a heterogeneidade espacial da distribuição da água no solo ao longo dos meses (Jackson *et al.*, 1999; Quesada *et al.*, 2004; Bezerra *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2005).

O aumento nos valores de CVA e ADP observados no mês de maio (início da estação seca) em relação ao mês de abril é consequência da alta precipitação que ocorreu no final do mês de abril (19 mm no dia 30 de abril de 2005), a qual somou 70,7 mm até a data de coleta de dados, realizada nos dias 4 e 5 de maio (Figura 7b). Ao contrário, para as medições de resistividade realizadas no dia 19 de abril, não houve precipitação durante 17 dias prévios a estas medições. O mês de outubro é normalmente considerado na literatura como o mês que marca o início da estação chuvosa, mas durante o ano de 2005 foram registrados baixos valores de precipitação para este mês, os quais somaram 8,4 mm. Por outro lado, para os meses de agosto e setembro, considerados meses secos, foram registrados um total de 85,2 mm de precipitação. As primeiras chuvas de outubro ocorreram no dia 15 de outubro (Figura 7b), 10 dias após as medições do teor de umidade do solo pelo método gravimétrico e fluxos de CO₂, realizadas no dia 05 de outubro de 2005. Além disso, antes das medições do dia 05 de outubro não houve precipitação por um período de 8 dias. O déficit de saturação hídrica do ar aumentou gradualmente de julho a setembro de 2005, alcançando valores máximos em meados de outubro (-2,33 kPa), o que corrobora as condições que caracterizam este período de seca nos ecossistemas savânicos do cerrado. No mês de outubro, a temperatura média do ar registrada foi a maior (27,5° C), ao mesmo tempo em que a média da umidade relativa do ar foi a menor de todo o período de estudo (34%). Os baixos valores de precipitação em outubro, e o consequente aumento

do déficit de saturação do ar, resultaram em um menor teor gravimétrico de água no solo, o que indica ser este um dos períodos mais secos do ano e de maior demanda evaporativa do solo. Em novembro o total de precipitação foi de 211 mm, porém do primeiro dia do mês até a data de medições de resistividade (realizadas no dia 09) choveu somente 59 mm (Figura 7b) o que resultou, juntamente com a alta demanda evaporativa deste período, nos maiores valores de resistividade para o mês de novembro. O rápido decréscimo dos valores da resistividade, e acréscimo dos valores de CVA e ADP, observados de novembro para dezembro, claramente indicam que os primeiros metros de profundidade do solo respondem rapidamente aos eventos de precipitação.

No estudo conduzido por Garcia-Montiel *et al.* (submetido), sobre a dinâmica de armazenamento de água nas camadas de solo ao longo do mesmo transecto deste estudo, estes autores descreveram outras zonas de resistividade localizadas imediatamente abaixo das zonas superficiais descritas no presente estudo. Estas camadas, entre 4 e 7 m de profundidade do solo, representam uma zona de transição entre as camadas superiores do solo (0-4 m) que possuem elevada resistividade e outras de baixa resistividade, localizadas entre 7 a 10 m de profundidade do solo. Esta última zona de resistividade foi definida por Campos (2004) como uma zona que apresenta condições de saturação permanente de água e que, de acordo com outros estudos feitos na EEAE (Bezerra *et al.*, 2005) e RECOR/IBGE – Brasília, DF – (Oliveira *et al.*, 2005), armazena água que pode ser utilizada pelas plantas do estrato arbóreo durante a estação seca.

Em um estudo sobre o efeito da variação sazonal do conteúdo de água ao longo dos três primeiros metros do perfil do solo, em áreas de campo sujo sujeitas a diferentes regimes de queima, Quesada *et al.* (2004) observaram que estas camadas superficiais apresentaram maior variação no conteúdo de água, devido ao maior impacto da absorção de água pelas plantas nestas camadas. Este fato é corroborado pelos resultados de outros estudos (Castro & Kauffman, 1998) os quais registraram que cerca de 95% das raízes se concentram nas camadas mais superficiais do solo. Em geral, a alta demanda de água pelas plantas herbáceas, é responsável pela variação do conteúdo de água nas camadas superficiais do solo durante o início da estação chuvosa, período de maior atividade fisiológica e crescimento destas plantas, sendo que durante a estação seca a parte aérea das mesmas desseca (Castro & Kauffman, 1998). Por outro lado, durante a estação seca as

plantas do estrato arbóreo utilizam a água armazenada em maior profundidade, onde aproximadamente 5% das raízes garantem o suprimento de água (Caldwell *et al.*, 1998). O consumo de água por espécies de árvores decíduas e sempre-verde, abaixo de 2 m de profundidade do solo, foi demonstrado em outro estudo conduzido por Jackson *et al.* (1999), em uma área de cerrado *s.s.* da RECOR/IBGE.

Os resultados das análises das duas metodologias para o cálculo de CVA e ADP, por gravimetria ou resistividade, sugerem que nos primeiros centímetros do solo, o método gravimétrico parece ser mais sensível às mudanças no conteúdo de água do solo proveniente das primeiras chuvas. É possível que as interpolações realizadas pelo “GIS software IDRISI”, para obter os valores de resistividade na parte superior do perfil do solo tenha subestimado, para o mês de novembro, o conteúdo de água que infiltrou nas camadas superficiais do solo com a chegada das primeiras chuvas. Este é um aspecto que precisa ser melhor detalhado em estudos posteriores e mais dados precisam ser coletados.

RESPIRAÇÃO DO SOLO

A heterogeneidade do solo, decorrente de fatores como a entrada de resíduos vegetais e animais, a microbiota, a atividade radicular, e as variações do conteúdo de água têm influência marcante na respiração do solo (Amundson & Davidson, 1990). Os maiores valores totais de fluxos de CO₂ do solo no P1 podem estar relacionados aos maiores valores de CVA e ADP medidos para esta área, mas as análises de variância indicaram que a variação espacial dos fluxos de CO₂ encontrada na área de estudo não foi tão marcante. A baixa significância encontrada na variabilidade espacial pode estar relacionada à escala espacial amostrada durante este estudo, uma vez que o transecto cobriu uma área de vegetação relativamente homogênea. Outros estudos que relacionaram a estrutura e composição florística da vegetação deste mesmo transecto com os padrões de distribuição de água no solo demonstraram variação espacial da estrutura da vegetação (Ferreira, 2006), mas aparentemente esta variação não foi suficientemente grande para produzir padrões espaciais mais marcados que pudessem afetar a respiração do solo.

Em estudos relacionados a produção de gases traços, tal como o CO₂, pode ser necessário incrementar a escala espacial a um nível que permita incorporar suficiente heterogeneidade dos padrões de vegetação, que determinem diferenças marcantes na

respiração do solo. Outros estudos focalizados em ecossistemas com diferentes taxas de entrada de serapilheira e atividade radicular associadas ao tipo de vegetação, encontraram diferenças significativas na respiração do solo (Pinto *et al.*, 2002). O estudo de Pinto *et al.* (2002) demonstrou que os fluxos de CO₂ do solo foram maiores no cerrado *sensu strictu* do que no campo sujo, ambos protegidos do fogo. Os maiores fluxos de CO₂ do solo, observados no cerrado *s.s.*, foram explicados como consequência de uma maior entrada de serapilheira e maior atividade microbiana deste cerrado. Em outro estudo realizado na Amazônia, Salimon *et al.* (2004) registraram maiores fluxos de CO₂ do solo nos ecossistemas de pastagens do que nos ecossistemas de florestas, provavelmente devido à alta produtividade primária que caracterizam as pastagens, a qual é responsável pelo incremento dos estoques de carbono nas camadas superficiais do solo.

Embora os resultados obtidos neste estudo indiquem que dentro da área do transecto amostrado a heterogeneidade espacial do solo mostrou uma tendência a influenciar a variação observada na produção de gases de CO₂ do solo, o efeito sazonal foi maior e mais determinante do que o efeito espacial. Por outro lado, a alta frequência da amostragem em escala de tempo, também permitiu detectar mais claramente os padrões sazonais da respiração do solo.

A marcada sazonalidade que caracteriza as savanas do cerrado é um fator que determina a dinâmica dos processos deste ecossistema (Miranda *et al.*, 1997; Santos *et al.*, 2003). Estudos prévios, feitos em outros ecossistemas savânicos e na Amazônia, demonstraram claramente o efeito da sazonalidade da precipitação nos fluxos de CO₂ produzidos pela respiração do solo (Zepp *et al.*, 1996; Anderson & Poth, 1998; Pinto *et al.*, 2002; Varella *et al.*, 2004; Salimon *et al.*, 2004). Estes estudos também mostraram que os maiores fluxos de CO₂ do solo foram registrados durante o período de chuvas.

Neste estudo, os maiores fluxos de CO₂ do solo foram observados no início da estação seca ($3,3 \pm 0,3 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ no mês de maio), sendo que após este período foi observada uma diminuição do conteúdo de água do solo, acompanhada pela redução progressiva da respiração do solo. O acréscimo dos valores de fluxo de CO₂ do solo observado durante o mês de outubro (coleta no dia 5 de outubro), ocorreu logo após os primeiros eventos de chuva ao final do mês de setembro. Entretanto, a maior variação nos valores de conteúdo de água no solo, entre 0 e 5 cm do solo, foi encontrada entre novembro

e dezembro, o que resultou em um acréscimo de 2 vezes nos valores de umidade do solo, valores estes que chegaram a atingir níveis próximos da capacidade de campo em dezembro. Este acréscimo do conteúdo de água no solo no mês de dezembro contribuiu para um pequeno aumento dos fluxos de CO₂ neste mês ($1,8 \pm 0,2 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). De forma geral, os valores de fluxo de CO₂ do solo acompanharam a disponibilidade de água para as plantas (ADP_{RES}) entre 0 e 50 cm, tal como esperado.

Os valores de fluxo de CO₂ do solo observados neste estudo estão em acordo com os de outros trabalhos feitos no cerrado (Pinto *et al.*, 2002; Varella *et al.*, 2004; Miranda *et al.*, 1997), embora para os meses de novembro e dezembro, estes valores estejam abaixo dos encontrados na literatura. Em área de cerrado *s.s.* protegida do fogo, Pinto *et al.* (2002) registraram fluxos de CO₂ do solo variando de 3 e 5 (chuva) e 2 e 4 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (seca). No campo sujo, os valores variaram de 3 a 4 (chuva) e 2 e 3 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (seca). Varella *et al.* (2004) encontraram, em um cerrado *s.s.*, que os valores de fluxo de CO₂ do solo apresentaram um padrão sazonal variando entre 2 e 4 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ durante as estações seca e chuvosa, respectivamente. As estimativas da respiração do solo feitas em cerrado *s.s.*, encontraram valores de fluxo de 1,6 a 2,3 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ para a estação seca e chuvosa, respectivamente (Miranda *et al.*, 1997).

BIOMASSA E RESPIRAÇÃO BASAL MICROBIANA DO SOLO

A biomassa microbiana é de fundamental importância para os solos e os ciclos biogeoquímicos do ecossistema, uma vez que atua como ponte entre as transformações da matéria orgânica no solo que permite a liberação ou mineralização dos nutrientes na forma mais disponível para a absorção pelas plantas (Jenkinson, 1988). Os padrões espaciais de variabilidade da atividade microbiana do solo podem se manifestar em diferentes escalas, mas no presente estudo os valores do carbono da biomassa microbiana do solo não mostraram um efeito significativo dos pontos de coleta. Como foi discutido anteriormente, parece não ter havido neste estudo suficiente heterogeneidade dos padrões de distribuição de água no solo que pudesse produzir diferenças na vegetação e conseqüentemente afetar os valores da biomassa microbiana.

Dentro do contexto das variações entre diferentes tipos de vegetação do Cerrado, o estudo de Oliveira *et al.* (2001) registrou maiores valores de carbono da biomassa microbiana em mata de galeria, do que no cerradão ou campo sujo. Estes resultados são explicados como resultado da maior entrada de serapilheira na mata de galeria, e maior qualidade dos resíduos vegetais e matéria orgânica do solo neste ecossistema. Em outro estudo, solos sob diferentes coberturas florestais, os quais apresentaram diferenças na quantidade de serapilheira acumulada e teores de N na serapilheira, diferiram nos valores de biomassa microbiana, evolução de CO₂ e taxa de respiração basal microbiana (Gama-Rodrigues *et al.*, 1997). Solos sob coberturas florestais de eucalipto ou pinheiro mostraram maior acúmulo de serapilheira, biomassa microbiana e evolução de CO₂. Entretanto, a taxa de respiração basal foi maior em solos sob coberturas florestais de angico e capoeira, o que é explicado como consequência dos altos teores de N na serapilheira que propiciaram maior atividade microbiana (Gama-Rodrigues *et al.*, 1997). Em contraste aos estudos de Oliveira *et al.* (2001) e Gama-Rodrigues *et al.* (1997), o estudo de Silva (2004) realizado em áreas nativas de cerrado *s.s.* e campo sujo, não encontrou diferenças significativas entre os valores médios anuais de carbono da biomassa microbiana entre as duas fisionomias de cerrado. Estas duas fisionomias de vegetação são diferentes na medida em que o cerrado *s.s.* possui maior densidade arbórea e entrada de serapilheira do que o campo sujo. Entretanto, aparentemente estas diferenças não foram suficientes para afetar de forma significativa os valores de biomassa microbiana. Isto pode ser devido ao fato de que geralmente, as plantas herbáceas, presentes nas duas áreas, investem bastante em biomassa radicular, contribuindo assim para a atividade microbiana. No contexto das diferenças espaciais, Geraldtes *et al.* (1995) encontraram valores de biomassa microbiana em solos (0-10 cm) sob mata natural da Amazônia de 314 mg C.kg⁻¹ solo, e em pastagens de 4, 10 e 15 anos de idade foi de 673, 299 e 511 mg C.kg⁻¹ solo, respectivamente. No mesmo estudo, houve uma redução de 72% da biomassa de C na camada de 20-30 cm, quando comparada à camada superficial, evidenciando a relação direta entre biomassa de C e a concentração de substrato orgânico e aeração do solo.

Embora o CBM do solo não apresentou heterogeneidade espacial, na escala temporal os resultados demonstraram um grande efeito da sazonalidade, fato que foi evidenciado pelo efeito significativo dos meses de coleta e da interação entre os pontos e meses de

coleta nos valores de carbono da biomassa microbiana, evolução de CO₂ e taxa de respiração basal. As maiores médias de carbono da biomassa microbiana, 612 e 609 mg C.kg⁻¹ solo, foram registradas para os meses de agosto (estação seca) e outubro (início da estação chuvosa), respectivamente. Os maiores valores da biomassa microbiana, encontrados no mês de agosto, provavelmente são explicados pelo efeito da adição de água a 100% da capacidade de campo, durante o preparo do solo para incubação para avaliar a biomassa microbiana, e da presença de carbono disponível no solo. Por outro lado, os maiores valores de biomassa microbiana observados para o mês de outubro (coleta dia 05 de outubro) podem ser atribuídos ao efeito das primeiras chuvas que ocorreram ao final do mês de setembro. A maior atividade microbiana observada em solos do cerrado, parece ocorrer durante o período de início da estação chuvosa, devido ao aumento da umidade do solo que estimula a atividade de microrganismos, que ficaram submetidos ao menor teor de umidade do solo durante os meses secos (Nardoto & Bustamante, 2003; Silva, 2004). Além disso, a entrada de água no solo via precipitação e a presença de carbono disponível propiciam a atividade decompositora da matéria orgânica pelos microrganismos do solo e o conseqüente aumento dos fluxos de CO₂ (*in situ*), evolução de CO₂ (*ex situ*) e taxa de respiração basal. No caso das amostras de solo provenientes do mês de agosto, as quais apresentaram baixo teor de umidade, o efeito da adição de água na atividade microbiana pode ter sido o mesmo descrito acima.

No que se refere à sazonalidade e às variações espaciais da atividade microbiana, relacionadas aos ciclos de água, C e N, o estudo de Nardoto & Bustamante (2003) encontrou, em uma área de cerrado *s.s.* queimada (0-5 cm do solo), que com a chegada da estação chuvosa (novembro), ocorreu um pico da atividade microbiana (850 mg C.kg⁻¹ solo) e alta imobilização de nitrogênio (N) pelos microrganismos. Porém, a partir de dezembro foi observada uma diminuição da biomassa microbiana (350 mg C.kg⁻¹ solo) nas áreas queimada e não queimada, período em que as taxas de mineralização do N orgânico aumentaram. Em outro estudo realizado em área de pastagem e cerrado *s.s.*, Varela *et al.* (2004) observaram maiores valores de carbono da biomassa microbiana no início da estação chuvosa, entre setembro e novembro, e um decréscimo tanto nos meses posteriores quanto no início da estação seca.

DISTRIBUIÇÃO DA BIOMASSA DE RAÍZES

A maior concentração de raízes, tanto grossas como finas, foram observadas nos primeiros 30 cm de profundidade do solo. Em média, entre 80,3% e 87,3% da biomassa de raízes grossas e finas, respectivamente, se concentraram entre 0 e 30 cm de profundidade do solo, o que está de acordo com outros estudos feitos no Cerrado, os quais registraram que cerca de 80% da biomassa de raízes foi encontrada nos primeiros 30 cm do solo (Abdala *et al.*, 1998; Castro & Kauffman, 1998; Rodin, 2004; Oliveira *et al.*, 2005). Entretanto, mesmo uma proporção relativamente pequena de raízes (< 10%) em camadas mais profundas do solo é suficiente para garantir o acesso das plantas à água armazenada nestas camadas (Caldwell *et al.*, 1998; Schenk & Jackson, 2002; Moreira *et al.*, 2003).

Considerando uma profundidade de solo entre 0 e 50 cm, este estudo encontrou um valor da biomassa total de raízes grossas de cerca de 55 Mg ha⁻¹. Este valor está acima dos valores registrados por Rodin (2004), para outras áreas de campo sujo, cerrado *s.s.* e cerrado denso localizadas na RECOR/IBGE, para as quais a autora encontrou valores de biomassa de raízes de 10,2, 21 e 20 Mg ha⁻¹, respectivamente. O mesmo estudo registrou um valor de 10,0 Mg ha⁻¹ para o cerrado denso da EEAE. O decréscimo da contribuição relativa (percentual) da biomassa de raízes grossas com o acréscimo da profundidade amostrada encontrado nas áreas dos P1 e P2 concorda com o que freqüentemente é registrado na literatura (Jackson *et al.*, 1996; Rodin, 2004). Por outro lado, o fato de que o P3 mostrou uma tendência de acréscimo da biomassa de raízes grossas com o aumento da profundidade amostrada sugere as claras diferenças espaciais que podem ocorrer dentro do transecto. Enquanto que 76 % da contribuição relativa (percentual) da biomassa de raízes grossas foi encontrada nos 10 primeiros centímetros de profundidade do solo em P1, em P3 cerca de 47% da contribuição relativa (percentual) da biomassa de raízes grossas foi encontrada no intervalo de profundidade de 30 e 50 cm (Figura 20). Estas diferenças coincidiram com o fato do P3 ter maior conteúdo de água nas camadas de solo abaixo de 400 cm. Os elevados valores de média e desvio-padrão observados para a biomassa de raízes grossas do P1, entre 0 e 5 cm de profundidade do solo, são explicados como consequência da amostragem em uma das trincheiras, cuja escavação ficou perto de uma árvore de grande porte. Este fato revelou a grande heterogeneidade espacial da biomassa de

raízes grossas no transecto de estudo, embora não tenha sido encontrada diferença significativa na distribuição da biomassa de raízes grossas entre os pontos de coleta.

Estudos conduzidos ao longo de um gradiente de vegetação de tipo fitofisionômicos de cerrado na RECOR/IBGE (Castro & Kauffman 1998) observaram um padrão de aumento da biomassa subterrânea (fina e grossa), com o aumento de vegetação arbórea, desde campo limpo até cerrado denso. Este mesmo estudo de Castro & Kauffman (1998), encontrou um aumento na biomassa de raízes grossas (≥ 6 mm) desde 7,1 Mg.ha⁻¹ observada no campo limpo até 37,5 Mg.ha⁻¹ observada no cerrado denso, o qual indica um aumento de mais de cinco vezes na biomassa de raízes ao longo do gradiente de vegetação. No entanto, Rodin (2004) observou uma diferença significativa na biomassa subterrânea grossa entre os ecossistemas do cerrado, o mesmo não tendo sido observado para a biomassa de raízes finas. Para a biomassa de raízes grossas, as menores médias foram registradas para a pastagem e o campo sujo, em comparação ao cerrado *s.s.* e cerrado denso, devido a ausência ou decréscimo de vegetação arbórea. Apesar disso, a distribuição da biomassa subterrânea, fina e grossa, ao longo do perfil do solo foi semelhante entre estes ecossistemas.

O valor total da biomassa de raízes finas de 14 Mg.ha⁻¹ encontrado neste estudo para a profundidade entre 0 e 50 cm, foram similares aos registrados para o cerrado denso, cerrado *s.s.* e campo sujo de 10,4, 9,6 e 12,4 Mg.ha⁻¹, respectivamente por Castro & Kauffman (1998). A redução significativa da biomassa fina com o aumento da profundidade do solo, concorda com o padrão observado em outros estudos feitos no cerrado (Castro & Kauffman, 1998; Rodin, 2004; Oliveira *et al.*, 2005) ou em outros biomas do mundo (Jackson *et al.*, 1996; Schulze *et al.*, 1996; Singh *et al.*, 1998). O decréscimo da contribuição relativa (percentual) da biomassa de raízes finas ao longo das profundidades amostradas foi mais marcado nas áreas dos P1 e P2, onde as camadas de solo entre 0-10 cm de profundidade apresentaram cerca de 65% da contribuição relativa de biomassa de raízes, sendo que este percentual diminuiu para cerca de 12% no P1 e 8% no P2 nas camadas entre 30-50 cm de profundidade. Na área do P3 pelo contrário, foi encontrada uma maior proporção relativa da biomassa de raízes finas nas camadas entre 10-30 cm de profundidade. Este deve ter sido um dos fatores responsáveis pela diferença significativa nos valores de biomassa de raízes finas entre os pontos de coleta, bem como

pela interação significativa da profundidade do solo e ponto de coleta. A distribuição desigual da biomassa de raízes finas entre os pontos de coleta sugere que, para esta fração da biomassa de raízes, o ambiente subterrâneo deste transecto parece ser bastante heterogêneo.

Embora a biomassa total e contribuição relativa de raízes tendam a diminuir com o aumento da profundidade do solo, em outra área de cerrado *s.s.* próxima à Brasília (DF), o estudo de Abdala *et al.* (1998) encontrou um aumento na biomassa total de raízes (grossas + médias + finas) entre 10-50 cm, tal como ocorreu na área do P3 deste estudo. Estes autores observaram que a alta variação da biomassa de raízes ao longo do perfil do solo, ocorreu devido à variação dos valores de biomassa de raízes grossas (> 10 mm), enquanto que a biomassa de raízes médias (entre 2 e 10 mm) e finas (< 2 mm) apresentou uma distribuição mais homogênea entre as amostras. Castro & Kauffman (1998) observaram que, embora houvesse um aumento da biomassa de raízes finas (≤ 5 mm de diâmetro) ao longo do gradiente, de campo limpo a cerrado denso, sua contribuição relativa diminuiu de 56% no campo limpo a 29% no cerrado denso. Em outro trabalho Oliveira *et al.* (2005) encontraram que a densidade e a distribuição da biomassa de raízes finas não diferiram entre cerrado denso e campo sujo, sendo que as raízes finas foram encontradas até 3 m de profundidade do solo (Oliveira *et al.*, 2005). Dentro do contexto da distribuição da biomassa de raízes, Singh *et al.* (1998) encontraram similaridade na distribuição vertical da biomassa de raízes em campos (vegetação dominada por gramíneas) com solos diferentes na textura e na distribuição de água. Schulze *et al.* (1996), analisando os dados de distribuição de raízes e precipitação em vários biomas, encontrou que a razão entre a parte subterrânea:aérea tendeu a aumentar com a redução da precipitação. Além disso, embora o conteúdo de água das camadas superficiais do solo foi mais utilizado pelas plantas, a profundidade máxima das raízes (3 m) aparentemente foi determinada pela presença de água em maior profundidade do solo.

Em uma análise de 92 perfis de solos pertencentes a diversos ecossistemas, inclusive aqueles limitados por água, Schenk & Jackson (2002) observaram que grande parte da variação da dimensão dos sistemas radiculares pode ser inferida através do clima, tamanho da copa e hábito das plantas. Assim, a profundidade das raízes deve ser máxima em regiões com clima subtropical (ou tropical) e com maior densidade arbórea, onde

ocorre: 1) suprimento sazonal de água e esta pode ser armazenada em maior profundidade no solo, e 2) demanda evaporativa desta água durante a estação seca. Neste contexto, pode-se prever que as formas savânicas e florestais do cerrado estão entre as que possuem maior profundidade, densidades de raízes (Rawstcher, 1948; Canadell *et al.*, 1996; Jackson *et al.*, 1996; Schenk & Jackson, 2002), e um elevado valor da razão parte subterrânea:aérea (Jackson *et al.*, 1996; Abdala *et al.*, 1998; Castro & Kauffman, 1998).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, o transecto estabelecido para as medições de resistividade apresentou uma alta heterogeneidade quanto à distribuição de água no solo, tanto horizontal (275 m) quanto vertical (37 m), evidenciada pelos perfis bidimensionais de resistividade. A sazonalidade no Cerrado, através do balanço entre precipitação e evapotranspiração, teve um importante efeito sobre a dinâmica do armazenamento de água no solo, especialmente nas camadas superficiais (< 200 cm). A sazonalidade, assim como a heterogeneidade espacial do ambiente subterrâneo, determinaram a variação nos valores de resistividade, conteúdo volumétrico de água e disponibilidade de água para as plantas nas camadas superficiais do solo, ao longo do transecto de estudo.

As duas metodologias empregadas para a determinação do CVA e ADP, métodos gravimétrico e resistividade, podem ser consideradas complementares para realizar medições do teor de umidade nas camadas superficiais do solo, sendo que cada metodologia tem sua vantagem e desvantagem. A técnica que resulta em perfis bidimensionais de resistividade permite visualizar a heterogeneidade da distribuição da água no perfil do solo, tanto horizontal quanto vertical, e tem uma importante aplicação em estudos ecológicos que consideram a escala de paisagem (Ferreira, 2006; Garcia-Montiel *et al.*, submetido).

Este estudo concluiu que a respiração do solo foi influenciada de forma significativa pela sazonalidade da precipitação, entretanto a variabilidade espacial foi marginalmente significativa. Embora tenha sido encontrada diferenças espaciais nos valores de resistividade, CVA, ADP, biomassa de raízes grossas e finas, estas diferenças não foram suficientes para afetar a respiração do solo. A vegetação, através da entrada e qualidade da matéria orgânica do solo, que poderia promover diferenças espaciais na respiração do solo, é relativamente homogênea no transecto de estudo. No presente trabalho, a escala espacial (parcela) não foi suficiente para detectar uma variação marcante na respiração do solo. Por outro lado, a frequência da amostragem na escala de tempo, permitiu verificar mais

claramente os padrões sazonais da respiração do solo, biomassa microbiana e taxa de respiração basal microbiana.

A biomassa de raízes grossas e finas se concentrou nos primeiros 30 cm de profundidade do solo, tendo redução significativa entre 30-50 cm (exceto para as raízes grossas no P3), o que está em acordo com diversos estudos feitos no Cerrado (Abdala *et al.*, 1998; Castro & Kauffman, 1998; Rodin, 2004; Oliveira *et al.*, 2005).

O conteúdo de água do solo exerce papel importante sobre os processos do ecossistema do Cerrado, tal como as emissões de CO₂, um gás de efeito estufa, do solo para atmosfera. No presente estudo, a sazonalidade do teor de umidade no solo claramente teve influência na respiração do solo. Dentro desta perspectiva, são importantes os estudos que possam aperfeiçoar as técnicas de determinação de água no solo, assim como identificar as combinações dos fatores que afetam a respiração do solo.

Anexo 1. Análise textural e pH do Latossolo Vermelho em uma área de cerrado denso próxima ao transecto de estudo, na Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF. Os dados de análise textural são de Bezerra (2003).

Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação textural
0-10	68 ± 0	13 ± 0	19 ± 0	Muito argiloso
10-20	71 ± 4	11 ± 1	19 ± 2	Muito argiloso
40-50	72 ± 6	11 ± 3	17 ± 3	Muito argiloso
90-100	72 ± 4	13 ± 4	16 ± 0	Muito argiloso
pH do solo	Maior média	Menor média		
Em água	4,3 ± 0,2	3,5 ± 0,1		
Em KCl	4,1 ± 0,1	3,8 ± 0,1		

Média ± desvio padrão

Anexo 2. Valores médios de temperatura T (°C) a 2,5 e 5 cm de profundidade do solo, temperatura do ar interno das câmaras T (°C) utilizadas nas medições de fluxos de CO₂ do solo nos três pontos de coleta, da Estação Ecológica de Águas Emendadas, Planaltina, DF, entre maio e dezembro de 2005.

Meses	Pontos	T a 2,5 cm solo	T a 5 cm solo	T câmara
Maio	1	22 ± 1	21 ± 1	28 ± 2
	2	23 ± 1	22 ± 1	29 ± 2
	3	26 ± 3	24 ± 2	33 ± 3
Junho	1	23 ± 2	22 ± 2	26 ± 1
	2	25 ± 3	24 ± 2	30 ± 2
	3	27 ± 3	25 ± 3	34 ± 2
Julho	1	21 ± 1	20 ± 1	29 ± 2
	2	21 ± 0,4	20 ± 1	29 ± 3
	3	26 ± 3	23 ± 3	33 ± 3
Agosto	1	21 ± 1	20 ± 1	27 ± 1
	2	20 ± 1	19 ± 1	26 ± 1
	3	23 ± 1	21 ± 2	26 ± 1
Setembro	1	27 ± 1	25 ± 1	36 ± 3
	2	30 ± 4	27 ± 3	38 ± 6
	3	29 ± 2	27 ± 1	39 ± 3
Outubro	1	29 ± 1	27 ± 1	36 ± 2
	2	31 ± 2	29 ± 2	41 ± 5
	3	35 ± 0,3	33 ± 1	42 ± 1
Novembro	1	-	-	-
	2	-	-	-
	3	-	-	-
Dezembro	1	23 ± 0,3	23 ± 0,2	26 ± 0,2
	2	25 ± 1	24 ± 1	29 ± 1
	3	26 ± 1	25 ± 1	32 ± 2

- mês sem dados coletados devido a problemas técnicos

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALA, G.C.; CALDAS, L.S.; HARIDASAN, M. & EITEN, G. Above and belowground organic matter and root:shoot ratio in a cerrado in Central Brazil. *Brazilia Journal of Ecology*, 2:11-23, 1998.
- AMUNDSON, R.G. & DAVIDSON, E.A. Carbon dioxide and nitrogenous gases in the soil atmosphere. *Journal of Geochemical Exploration*, 38:13-41, 1990.
- ANDERSON, J.P.E. & DOMSCH, K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 10:215-221, 1978.
- ANDERSON, I.C. & POTH, M.A. Controls on Fluxes of trace gases from brazilian cerrado soils. *Journal of Environmental Quality*, 27:1117-1124, 1998.
- ASSAD, E.O. & EVANGELISTA, B.A. Análise frequencial da precipitação pluviométrica. In: ASSAD, E.D., ed. *Chuva no Cerrado*. 2.ed, Versão 1.0. 2001. CD-ROM
- BEZERRA, L. Disponibilidade de água para as plantas e evapotranspiração em um cerrado denso, um cerrado strictu sensu e uma pastagem plantada. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ecologia. Universidade de Brasília. 42p, 2003.
- BEZERRA, L.; SILVA, E.M. & KLINK, C.A. Disponibilidade de água e evapotranspiração em ecossistemas do cerrado brasileiro. In: ATAROFF, M. & SILVA, J.F., eds. *Dinâmica hídrica en sistemas neotropicales: investigaciones en dinámica hídrica de la Red Ricas*. Mérida, Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas - Universidad de Los Andes, 2005. p.43-48.
- BUCCI, S. Arquitectura hidráulica y relaciones hídricas de árboles de sabanas neotropicales: efectos de la disponibilidad de agua y nutrientes. Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exatas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, 198p., 2001.
- CALDWELL, M.M.; DAVIDSON, T.E.; RICHARD, J.H. Hydraulic lift: consequences of watter efflux from roots of plants. *Oecologia*, 113:151-161, 1998.
- CAMPOS, J.E.G. Hidrogeologia do Distrito Federal: Bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Brasileira de Geociências*, 34:41-48, 2004.
- CANADELL, J.; JACKSON, R.B.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E. & SCHULZE, E.D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108:583-595, 1996.
- CASTRO, E.A & KAUFFMAN, J.B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root biomass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, 14:263-283, 1998.

DAVIDSON, E.A., VERCHOT, L.V., CATTÂNIO, J.H., ACKERMAN, I.L. & CARVALHO, J.E.M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 48:53-59, 2000.

EITEN, G. The cerrado vegetation of central Brazil. *Botanical Review*, 38:201-341. 1972.

ENDE, C.N.V. Repeated measures analysis: Growth and other time-dependent measures. In: SCHEINER, S.M. & GUREVITCH, J., eds. *Design and analysis of ecological experiments*. New York, Chapman & Hall, 1993. p.113-137.

FELFILI, J.M. & SILVA, M.C. A comparative study of Cerrado (*sensu stricto*) vegetation in central Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 9:277-289, 1993.

FELFILI, J.M.; SILVA, M.C.; SEVILHA, A.C.; FAGG, C.W.; WALTER, B.M.T.; NOGUEIRA, P.E. & REZENDE, A.V. Diversity, floristic and structural patterns of Cerrado vegetation in Central Brazil. *Plant Ecology*, 175:37-46, 2004.

FERREIRA, J.N. Padrões da vegetação lenhosa relacionados à heterogeneidade espacial de água no solo em cerrado do Brasil Central. Tese de Doutorado. Departamento de Ecologia. Universidade de Brasília, 2006.

FRANCO, A.C. Ecophysiology of woody plants. In: OLIVEIRA, P.S. & MARQUIS, R.J., eds. *The Cerrados of Brazil*. New York, Columbia University Press, 2002. p.178-197.

FURLEY, P.A. & RATTER, J.A. Soil resources and plant communities of the central Brazilian cerrado and their development. *Journal of Biogeography*, 15:97-108, 1988.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. & BARROS, N.F. Biomassa microbiana de carbono e de nitrogênio de solos sob diferentes coberturas florestais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21:361-365, 1997.

GARCIA-MONTIEL, D.C.; FERREIRA, J.; BEZERRA, L.; BUSTAMANTE, M.; DAVIDSON, E.A.; SILVA, E.M. & SOLORZANO, L. Estimating seasonal plant-available soil water at landscape scales in a savanna ecosystem using two-dimensional resistivity profiling. *Submetido*.

GERALDES, A.P.A.; CERRI, C.C. & FEIGL, B.J. Biomassa microbiana de solo sob pastagens na Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 19:55-60, 1995.

GRIFFITHS, D.H. & BARKER, R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 29:211-226, 1993.

HARIDASAN, M. Solos do Distrito Federal. In: PINTO, M.N., org. *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 1993. p.321-344.

HODNETT, M.G.; PIMENTEL DA SILVA, L.; ROCHA, H.R. & SENNA, R.C. Seasonal soil storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *Journal of Hydrology*, 170:233-254, 1995.

HOFFMANN, W.A. & JACKSON, R.B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. *Journal of Climate*, 13:1593-1602, 2000.

JACKSON, P.C.; MEINZER, F.C.; BUSTAMANTE, M.; GOLDSTEIN, G.; FRANCO, A.; RUNDEL, P.W.; CALDAS, L.; IGLER, E. & CAUSIN, F. Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. *Tree physiology*, 19:717-724, 1999.

JACKSON, R.B.; CANADELL, J.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E. & SCHULZE, E.D. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108:389-411, 1996.

JACKSON, R.B.; JOBBÁGY, E.G.; AVISSAR, R.; ROY, S.B.; BARRET, D.J.; COOK, C.W.; FARLEY, K.A.; LE MAITRE, D.C.; McCARL, B.A. & MURRAY, B.C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 310:1944-1947, 2005.

JENKISON, D.S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: WILSON, J.R., ed. *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems*. Wallingford, C.A.B. International, 1988. p.368-386.

JENKISON, D.S. & POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil – V: a method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8:209-213, 1976.

MEINZER, F.C.; GOLDSTEIN, G.; FRANCO, A.C.; BUSTAMANTE, M.M.C.; IGLER, E.; JACKSON, P.; CALDAS, L.S. & RUNDEL, P.W. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species. *Functional ecology*, 13:273-282, 1999.

MENTE, A. 2000. As condições hidrogeológicas do Brasil. In: M???, C.P.R. ed. *Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. Fortaleza, LABHID-UFCE, 2000. p.323-340.

MIRANDA, A.C.; MIRANDA, H.S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; MCINTYRE, J.A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R. & BRASS, J. Carbon dioxide fluxes over a cerrado *sensu stricto* in central Brazil. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J.M. & VICTORIA, R.L. eds. *Amazonian Deforestation and Climate*. New York, John Wiley & Sons, 1996. p.353-363.

MIRANDA, A.C.; MIRANDA, H.S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; FRANCEY, R.J.; MCINTYRE, J.A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R. & BRASS, J. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. *Plant, Cell and Environment*, 20:315-328, 1997.

MOREIRA, M.Z.; SCHOLZ, F.G.; BUCCI, S.J.; STERNBERG, L.S.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F.C. & FRANCO, A.C. Hydraulic lift in a neotropical savanna. *Functional Ecology*, 17:573-581, 2003.

MOTTA, P.E.F.; CURTI, N. & FRANZMEIER, D.P. Relation of soils and geomorphic surfaces in the Brazilian Cerrado. In: OLIVEIRA, P.S. & MARQUIS, R.J., eds. *The Cerrados of Brazil*. New York, Columbia University Press, 2002. p.13-32.

NARDOTO, G.B. & BUSTAMANTE, M.M.C. Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomass in savannas of Central Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:955-962, 2000.

NEPSTAD, D.C.; CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G.H.; SILVA, E.D.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E. & VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 372:666-669, 1994.

OLIVEIRA-FILHO, A.T. & RATTER, J.A. Vegetation Physiognomies and woody flora of the Cerrado biome. In: OLIVEIRA, P.S. & MARQUIS, R.J., eds. *The Cerrados of Brazil*. New York, Columbia University Press, 2002. p.69-88.

OLIVEIRA-FILHO, A.T.; SHEPHERD, G.J.; MARTINS, F.R. & STUBBLEBINE, W.H. Environmental factors affecting physiognomic and floristic variation in an area of cerrado in central Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 5:413-431, 1989.

OLIVEIRA, J.R.A.; MENDES, I.C. & VIVALDI, L.J. Carbono da biomassa microbiana em solos do cerrado: comparação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, n.9, Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 2001. 22p.

OLIVEIRA, R.S.; BEZERRA, L.; DAVIDSON, E.A.; PINTO, F.; KLINK, C.A.; NEPSTAD, D.C. & MOREIRA, A. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. *Functional Ecology*, 19:574-581, 2005.

PINTO, A.S.; BUSTAMANTE, M.M.C.; KISSELLE, K.W.; BURKE, R.A.; ZEPP, R.G.; VIANA, L.T.; VARELLA, R.F. & MOLINA, M. Soil emissions of N₂O, NO and CO₂ in Brazilian Savannas: effects of vegetation type, seasonality and prescribed fires. *Journal of Geophysical Research*, 107:8089-8095, 2002.

QUESADA, C.A.; MIRANDA, A.C.; HODNETT, M.G.; SANTOS, A.J.B.; MIRANDA, H.S. & BREYER, L.M. Seasonal and depth variation of soil moisture in a burned open savanna (campo sujo) in central Brazil. *Ecological Applications*, 14:S33-S41, 2004.

RAICH, J.W. & SCHLESINGER, W.H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 44B:81-99, 1992.

RAWITSCHER, F. The water economy of the vegetation of the 'Campos Cerrados' in southern Brazil. *Journal of Ecology*, 36:237-268, 1948.

- REATTO, A.; CORREIA, J.R. & SPERA, S.T. Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S.M. & ALMEIDA, S.P., eds. Cerrado: ambiente e flora. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1998. p.47-86.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. R. Bras. Ci. Solo, 12:211-216, 1988.
- RESCK, D.V.S. Parâmetros físicos dos solos da região dos cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.2, Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1981. 17p.
- RIBEIRO, J. F. & WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S.M. & ALMEIDA, S.P., eds. Cerrado: ambiente e flora. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1998. p.89-166.
- ROCHA, H.R., FREITAS, H.C., ROSOLEM, R., JUÁREZ, R.I.N., TANNUS, R.N., LIGO, M.A., CABRAL, O.M.R. & DIAS, M.A.F.S. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (cerrado sensu stricto) in southeast Brazil. Biota neotropica, 2:1-11, 2002.
- RODIN, P. Distribuição da biomassa subterrânea e dinâmica de raízes finas em ecossistemas nativos e em uma pastagem plantada no Cerrado do Brasil Central. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ecologia. Universidade de Brasília, 89p., 2004.
- SALIMON, C.I.; DAVIDSON, E.A.; VICTORIA, R.L. & MELO, A.W.F. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. Global Change Biology, 10:833-843, 2004.
- SANTOS, A.J.B., SILVA, G.T.DA., MIRANDA, H.S., MIRANDA, A.C. & LLOYD, J. Effects of fire on surface carbon, energy and water vapour fluxes over *campo sujo* savanna in central Brazil. Functional Ecology, 17:711-719, 2003.
- SCHENK, H.J. & JACKSON, R.B. Rooting depths, lateral roots spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. Journal of Ecology, 90:480-494, 2002.
- SCHLESINGER, W.H. Biogeochemistry: an analysis of global change. San Diego, Academic Press, 1991.
- SCHLESINGER, W.H. & ANDREWS, J.A. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry, 48:7-20, 2000.
- SCHULZE, E.D.; MOONEY, H.A.; SALA, O.E., JOBBAGY E.; BUCHMANN N.; BAUER; G.; CANADELL, J.; JACKSON, R.B.; LORETI, J.; OESTERHELD, M.& EHLERINGER, J.R. Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. Oecologia, 108:503-511, 1996.
- SEATON, W.J. & BURBEY, T.J. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. Journal of Applied Geophysics, 51:21-41, 2002.

SHARMA, E.M. Environmental and Engineering Geophysics, New York, Cambridge University Press. 1997.

SILVA, M.R.S.S. *Produção de serapilheira, biomassa e diversidade de comunidades bacterianas do solo em áreas de Cerrado sob diferentes usos e manejos*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ecologia. Universidade de Brasília, 77p., 2004.

SILVA, M.C. & FELFILI, J.M. 1996. A vegetação da Estação Ecológica de Águas Emendadas. Brasília, 43p.

SINGH, J.S.; MILCHUNAS, D.G. & LAUENROTH, W.K. Soil water dynamics and vegetation patterns in a semiarid grassland. *Plant Ecology*, 134:77-89, 1998.

TABBAGH, A.; DABAS, M.; HESSE, A. & PANISSOD, C. 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma*, 97: 393-404, 2000.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.

VARELLA, R.F.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PINTO, A.S.; KISSELLE, K.W.; SANTOS, R.V.; BURKE, R.A.; ZEPP, R.G. & VIANA, L.T. Soil fluxes of CO₂, CO, NO, and N₂O from an old pasture and from native savanna in Brazil. *Ecological Applications*, 14:221-231, 2004.

WALKER, B.H. & LANGRIDGE, J.L. Predicting savanna vegetation structure on the basis of plant available moisture (PAM) and plant available nutrients (PAN): A case study from Australia. *Journal of Biogeography*, 24:813-825, 1997.

ZEPP, R.G.; MILLER, W.L. & BURKE, R.A. Effects of moisture and burning on soil-atmosphere exchange of trace carbon gases in a southern Africa savanna. *Journal of Geophysical Research*, 101:23,699-23,706, 1996