

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**JULIO CESAR NEVES DOS SANTOS**

**MENSURAÇÃO DA EROÇÃO DO SOLO NO SEMIÁRIDO EM DIFERENTES USOS  
DE TERRAS E ESCALAS ESPACIAIS**

**FORTALEZA**

**2012**

JULIO CESAR NEVES DOS SANTOS

MENSURAÇÃO DA EROÇÃO DO SOLO NO SEMIÁRIDO EM DIFERENTES USOS DE  
TERRAS E ESCALAS ESPACIAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientadora: Profa. Ph.D. Eunice Maia de Andrade

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- S235m Santos, Júlio Cesar Neves dos.  
Mensuração da erosão do solo no semiárido em diferentes usos de terras e escalas espaciais / Júlio Cesar Neves dos Santos. – 2012.  
100 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.  
Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
Orientação: Profª. Dra. Eunice Maia de Andrade.  
Coorientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.
1. Solos – Erosão. 2. Escoamento. I. Título.

JULIO CESAR NEVES DOS SANTOS

MENSURAÇÃO DA EROÇÃO DO SOLO NO SEMIÁRIDO EM DIFERENTES USOS DE  
TERRAS E ESCALAS ESPACIAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientadora: Profa. Ph.D. Eunice Maia de Andrade

Aprovada em: 31 de janeiro de 2012.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Ph.D. Eunice Maia de Andrade (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Co-orientador)  
Instituto Federal do Ceará – IFCE

---

Profa. Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio (Conselheira)  
Instituto Federal do Ceará – IFCE

---

Prof. Dr. Joaquín Navarro Hevia (Conselheiro)  
Universidad de Valladolid – Palencia/ES

Aos meus pais, Raimundo Pereira dos Santos e  
Maria Socorro Neves dos Santos.  
À minha irmã Juliana Neves dos Santos e  
À minha namorada Cleene Lima.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus.

Aos meus amados pais, por todo amor e carinho que me dedicaram no decorrer da minha vida, por estarem sempre dispostos a me oferecer o que têm de melhor e por todas as horas de suas vidas dedicadas a mim, pela grande ajuda e incentivo em tudo que fiz, sem vocês nada seria possível.

À minha irmã Juliana que sempre me incentivou a dar continuidade à vida acadêmica, e pela grande ajuda nos momentos mais difíceis dessa caminhada.

À minha namorada Cleene Agostinho de Lima pelo amor, companheirismo e compreensão ao longo desta jornada.

À Professora Dra. Eunice Maia de Andrade, pela sua competência, ensinamentos, brilhante orientação e, acima de tudo, confiança e amizade que ajudaram em muito no desenvolvimento do meu trabalho e no meu crescimento e amadurecimento pessoal e profissional.

Ao professor Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros, pela ajuda na organização das informações, pelas grandes dicas que contribuíram muito na análise dos resultados.

À professora Dra. Helba Araújo de Queiroz Palácio outrora orientadora da graduação e hoje companheira de Pós-Graduação pela amizade, paciência, dedicação, por sempre estimular meu crescimento profissional e pela atuação direta na etapa de campo.

À professora Dra. Ana Célia Maia Meireles pelos grandes ensinamentos científicos, fácil convivência, amizade, e o mais importante, por ter acreditado e confiado na minha capacidade.

Ao professor Joaquín Navarro Hevia pela sua participação na banca examinadora e contribuições para o melhoramento desse trabalho.

À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, pela oportunidade de realização do curso em nome do coordenador de Pós-Graduação, Claudivan Feitosa de Lacerda, pela excelente qualidade do ensino proporcionado. Aos professores, em especial: Eunice Andrade, José Carlos de Araújo, Luiz Alberto Mendonça, Adunias Teixeira, Claudivam Feitosa, Omar Pereira, Fernando Felipe Ferreyra, Marcus Bezerra, George Mamede, Julien Burte e Camboim.

Aos colegas contemporâneos do Mestrado, Alexandre Reuber, André Rufino, Carlos Alexandre Gomes Costa, Daniely, Daniel, Eduardo, Elivânia, Robevânia, João Valdenor, Teixeira, Teresa Raquel, Karísia, Monikuely Mourato (companheira de ensino médio até o mestrado), Nayara, Odílio, Rafaela, Ramyro, Cicero Lima, Clescy, Francisco Leandro, Joaquim Raimundo, Raimundo Nonato, Fabrício Mota, Francisco Bergson, Firmino Canafístula, Hernandez, Agrodualdo, Bruno, Clênio, Sávio, Cristian Epifânio, Leila, Carlos Henrique, Geocleber e Everton Alves.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa Massa (Manejo de Água e Solo no Semiárido) pelo excelente convívio e amizade: Amauri, Ana Célia, Adriana, Bergson, Cleiton, Cleisce, Cleene, Eveline, Fernando, Fredson, Helba, Joseilson, José Ailton, Júnior, Josivânia, Jairo, Lécio, Luizinho, Lobato, Márcio, Meilla, Nayara Luna, Naiara Sâmia, Paulilo e Samuel.

Em especial a todos os integrantes do Grupo MASSA no IFCE – Campus Iguatu que contribuíram efetivamente na realização da árdua etapa de campo: Adriana, Cleisce, Cleene, Helba, Joseilson, José Ailton, Josivânia, Júnior, Jean, Lobato, Márcio, Naiara Sâmia, Paulilo e Samuel.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de estudo e financiamento dessa pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Iguatu que através do Curso Superior de Tecnologia em Irrigação e Drenagem, oportuniza um ensino de qualidade. A todos os professores que fazem parte desta instituição.

Ao Laboratório de Água, Solo e Tecidos Vegetais do IFCE-Campus Iguatu, em nome do seu coordenador Adriano Erique de Oliveira Lima e dos técnicos Germano Elias Gomes e José Wellington Canuto Lima, e de todos os bolsistas e estagiários que viabilizaram a realização das análises de água e solo empregadas nessa investigação.

A todos aqueles que, de alguma maneira, incentivaram e colaboraram para a realização desta pesquisa.

Meu muito obrigado!!!

*“Cada pessoa em sua existência pode ter duas  
atitudes:  
construir ou plantar.  
Os construtores podem demorar anos em suas  
tarefas, mas um dia terminam aquilo que estavam  
fazendo.  
Então param e ficam limitados por suas próprias  
paredes.  
A vida perde o sentido quando a construção  
acaba.  
Mas existem os que plantam. Estes, às vezes,  
sofrem com tempestades, com as estações, e  
raramente descansam.  
Mas ao contrário de um edifício,  
O jardim jamais pára de crescer.  
E, ao mesmo tempo que exige atenção do  
jardineiro,  
Também permite que, para ele,  
A vida seja uma grande aventura.  
Os jardineiros sempre se reconhecerão entre si  
Porque sabem que na história de cada planta  
Está o crescimento de toda a Terra.”*  
(Paulo Coelho)



## RESUMO

SANTOS, Julio Cesar Neves dos. Universidade Federal do Ceará. Janeiro de 2012. **Mensuração da erosão do solo no semiárido em diferentes usos de terras e escalas espaciais.** Orientadora: Eunice Maia de Andrade. Co-orientador: Pedro Henrique Augusto Medeiros. Conselheiros: Helba Araújo de Queiroz Palácio, Joaquín Navarro Hevia.

A obtenção de dados de erosão do solo em diferentes escalas espaciais é de fundamental importância, principalmente no semiárido do Nordeste brasileiro onde esses dados são escassos. O semiárido brasileiro é vulnerável à erosão hídrica, principalmente devido às suas características climáticas, edáficas e às práticas de explorações insustentáveis, resultando no empobrecimento dos solos agrícolas e comprometendo a qualidade das águas dos reservatórios superficiais (principais reservas hídricas da região). Nesse sentido, o presente estudo objetivou gerar dados básicos de escoamento, produção de sedimento e analisar os principais processos e fontes de variação na perda de solo em diferentes escalas espaciais em região semiárida, bem como os processos naturais atuantes em cada escala, e os efeitos do uso do solo na conservação do meio. A área de estudo está localizada no semiárido cearense, na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe no município de Iguatu, no Centro Sul do Estado do Ceará. Os estudos de erosão e escoamento superficial foram conduzidos em três níveis de escala: microbacias com áreas em torno de 1 a 3 ha, parcelas de erosão de 20 m<sup>2</sup> e parcelas de 1 m<sup>2</sup>, todas sob condições de chuvas naturais. Ao todo, foram instaladas quatro microbacias experimentais, seis parcelas de erosão de 20 m<sup>2</sup> e seis parcelas de 1 m<sup>2</sup>, sob diferentes usos do solo; Caatinga nativa; Caatinga raleada; desmatamento seguido de enleiramento e cultivo de milho; e desmatamento, queima com cultivo de pastagem. O estudo ocorreu durante os anos de 2009, 2010 e 2011, com chuvas concentradas de janeiro a junho, correspondendo à estação chuvosa da região. As coletas para quantificação do volume escoado superficialmente e de amostras para determinação da perda de sedimentos foram realizadas a cada evento de chuva erosiva, no acumulado de 24 horas. Ocorreram maiores coeficientes de escoamento e perdas de solo na escala de 20 m<sup>2</sup> que nas escalas de 1 m<sup>2</sup> e de microbacia: em relação à escala de 1 m<sup>2</sup>, a parcela de 20 m<sup>2</sup> provoca um aumento da velocidade de escoamento ao longo da vertente, aumentando também a capacidade de transporte; na escala de microbacia, a presença de áreas com baixas declividades atuaram como zonas receptoras de sedimentos. Na área com cobertura de Caatinga Nativa, a presença de pontos de alta erodibilidade e com solo nu, na escala de microbacia, é responsável pela maior parte das perdas de solo, fato que não pode ser representado na pequena escala de parcela. Já a área que recebeu o tratamento de raleamento, apresentou na escala de microbacia menor coeficiente de escoamento superficial e menores perdas de solo em relação à área Caatinga Nativa. O manejo de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, proporcionou incremento no coeficiente de escoamento superficial e nas perdas de solo em relação ao período anterior, com cobertura de Caatinga nativa. O tratamento de desmatamento, queimada e cultivo de pastagem (*Andropogon gayanus* Kunt), resultou nas maiores perdas de solo e água em relação aos demais manejos estudados.

**Palavras-chave:** Escoamento superficial. Microbacia. Parcela de erosão. Manejo da Caatinga.

## ABSTRACT

SANTOS, Julio Cesar Neves dos, Universidade Federal do Ceará. January 2012. **Measurement of soil erosion in semi-arid region at different uses and spatial scales.** Advisor: Eunice Maia de Andrade. Examiners: Pedro Henrique Augusto Medeiros, Helba Araújo de Queiroz Palácio, Joaquín Navarro Hevia.

Obtaining data of soil erosion on different spatial scales is of fundamental importance, especially in the semi-arid regions of northeastern Brazil where such data are scarce. The semi-arid region is vulnerable to water erosion, mainly due to its climatic and edaphic characteristics, and the unsustainable land use practices, which result in the impoverishment of agricultural soils, and compromise the water quality of the surface reservoirs (the main water resources of the region). The main goal of this study was generate basic data flow, sediment yield and analyze the main process and sources of variation in soil loss at different scales in semi-arid region. It analyzed the natural process that is operating in each one scale and the land use effects in the conservation of the environment. The study area is located in the semi-arid region of the state of Ceará, in the watershed of the Upper Jaguaribe in the Iguatu County, in the south central area of the state. Studies of erosion and surface runoff were conducted on three scale levels: watersheds with areas of around 1 to 3 ha, erosion plots of 20 m<sup>2</sup>, and plots of 1 m<sup>2</sup>, all under natural-rainfall conditions. In all, four experimental watersheds were installed together with six erosion plots of 20 m<sup>2</sup> and six plots of 1m<sup>2</sup> with different types of land use; native Caatinga; thinned Caatinga; deforestation followed by bunching and the cultivation of corn, and deforestation, burning and the cultivation of pasture. The study was carried out from 2009 to 2011, with rainfall concentrated in the months of January to June, corresponding to the rainy season in the region. Samples to quantify the volume of surface runoff, and samples to determine sediment loss, were taken for each erosive-rain event in an accumulated period of 24 hours. There were higher runoff coefficients and soil losses on the 20 m<sup>2</sup> scale than on the 1 m<sup>2</sup> and watershed scales: on the scale of 1 m<sup>2</sup>, the plot of 20 m<sup>2</sup> causes an increase in flow velocity down slopes, also increasing transport capacity; on the scale of the watershed, places with low slopes acted as receiving areas for sediment. In the area with native Caatinga vegetation, the presence of points of high erodibility and of bare soil, on the watershed scale, is responsible for most of the soil loss, a fact that is not present on the small scale of the plots. The area which was thinned out, however, presented a lower runoff coefficient and less soil-loss on the watershed scale, in relation to the area of native Caatinga. After deforestation, bunching of the plant remains, and planting of corn, an increase in the runoff coefficient and soil loss can be seen in relation to the previous period with a coverage of native Caatinga. The treatment of deforestation, burning and the cultivation of pasture (*Andropogon gayanus* Kunt) resulted in the greatest soil and water losses in relation to the other management strategies studied.

**Keywords:** Surface runoff. Watershed. Erosion plot. Caatinga management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área em estudo no Estado do Ceará, Brasil.....	31
Figura 2 – Perfil do solo das microbacias estudadas, microbacia B1 e B2 (a), microbacia B3 (c) e microbacia B4 (c).....	33
Figura 3 – Detalhe da estrutura do solo com formação de fendas (a) e acesso à área no período chuvoso (b) .....	33
Figura 4 – Modelo numérico das microbacias (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 e localização das parcelas experimentais de erosão .....	38
Figura 5 – Distribuição das classes de declividade das microbacias (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 e localização das parcelas experimentais de erosão .....	39
Figura 6 – Microbacia experimental B1, cobertura composta de Caatinga Nativa (CN), estação chuvosa (a) e estação seca (b) .....	40
Figura 7 – Microbacia experimental B2, tratamento de raleamento (R), estação chuvosa (a) e estação seca (b).....	40
Figura 8 – Microbacia experimental B4, tratamento de desmatamento, queima e cultivo de capim, estação seca (a) e estação chuvosa (b) .....	41
Figura 9 – Microbacia experimental B3, manejo de desmatamento e enleiramento do material vegetal e cultivo de milho entre leiras, antes (a) e após (b) o cultivo do milho.....	41
Figura 10 – Calha Parshal em fibra de vidro, nas microbacias experimentais, Iguatu- CE .....	43
Figura 11 – Sensor de nível (linígrafo) usado para medir a altura da água na calha.....	43
Figura 12 – Torre coletora de sedimento (a) e detalhe das garrafas coletoras de água e sedimentos provenientes de escoamento superficial (b).....	46
Figura 13 – Fosso coletor de sedimentos em arraste de leito (a) e em detalhe o processo de coleta de amostras de água e sedimentos (b) .....	46
Figura 14 – Parcela experimental de erosão de 20 m <sup>2</sup> (a); primeiro tanque coletor (b), segundo e terceiro tanques coletores (c), Iguatu-CE .....	48
Figura 15 – Parcela de erosão de 1 m <sup>2</sup> (a) e sistema coletor de água e sedimento (b), Iguatu-CE.....	50

Figura 16 – Determinação das concentrações de sólidos totais na água de escoamento: Cápsulas com amostra de água antes da evaporação (A) e cápsulas após a evaporação (B).....	51
Figura 17 – Pluviógrafo do tipo Bâscula (a) e pluviômetro <i>Ville de Paris</i> (b) instalados na área de estudo, Iguatu-CE.....	52
Figura 18 – Vegetação de Caatinga Nativa na estação seca, na microbacia experimental de Iguatu-CE.....	55
Figura 19– Precipitação (PPT), intensidade máxima em trinta minutos ( $I_{30}$ ) e índice de erosividade ( $EI_{30}$ ) para o ano de 2009 (a), 2010 (b) e 2011 (c) nas microbacias experimentais de Iguatu-CE.....	57
Figura 20 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE.....	58
Figura 21 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE.....	59
Figura 22 – Extrato herbáceo na microbacia B1/Caatinga nativa (a), e microbacia B2 com manejo de Raleamento da Caatinga (b), no período chuvoso na estação experimental de Iguatu-CE.....	60
Figura 23 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE.....	61
Figura 24 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento, queima e cultivo de <i>Andropogon gayanus</i> Kunt no primeiro e segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE.....	62
Figura 25 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para as parcelas de erosão com solo nu em área com Luvissole e Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.....	64
Figura 26 – Relação entre precipitação e umidade antecedente do solo, para a escala de parcela de erosão de 1 m <sup>2</sup> (a), parcela de 20 m <sup>2</sup> (b) e microbacia (c), na estação experimental de Iguatu-CE.....	66

Figura 27 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE .....	67
Figura 28 – Ponto de alta produção de sedimento na microbacia B1, desmoronamentos em pontos de maior declividade (a), formação de pedestais nas rochas pela erosão hídrica (b), erosão em curso (c) e parcela de erosão B1 (d).....	68
Figura 29 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE .....	69
Figura 30 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	71
Figura 31 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE.....	72
Figura 32 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE.....	73
Figura 33 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	74
Figura 34 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE.....	76
Figura 35 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE.....	77
Figura 36 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	78
Figura 37 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento queima	

e cultivo de <i>Andropogon gayanus</i> Kunt no primeiro e segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE .....	79
Figura 38 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento, queima e cultivo de <i>Andropogon gayanus</i> Kunt no primeiro e segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE .....	80
Figura 39 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo de desmatamento, queima e cultivo de <i>Andropogon gayanus</i> Kunt no segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	81
Figura 40 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para as parcelas de erosão com solo nu em área com Luvissole e Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	82
Figura 41 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para as parcelas de erosão com solo nu em área com Luvissole e Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	83
Figura 42 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a parcela de erosão com solo nu em área com Luvissole, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	84
Figura 43 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a parcela de erosão com solo nu em área com Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	84
Figura 44 – Razão entre escalas espaciais para o coeficiente de escoamento superficial, entre as parcelas de 20 m <sup>2</sup> / parcelas de 1 m <sup>2</sup> , na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	87
Figura 45 – Razão entre escalas espaciais para a perda de solo, entre as parcelas de 20 m <sup>2</sup> / parcelas de 1 m <sup>2</sup> , na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011 .....	88
Figura 46 – Razão entre escalas espaciais para o coeficiente de escoamento superficial, entre as microbacias / parcelas de 20 m <sup>2</sup> , para o período estudado, na estação experimental de Iguatu-CE .....	89
Figura 47 – Razão entre escalas espaciais para a perda de solo, entre as microbacias / parcelas de 20 m <sup>2</sup> , para o período estudado, na estação experimental de Iguatu-CE.....	90

Figura 48 – Microbacia B4, no ano de 2010 após o tratamento, detalhe da alta produção de sedimento no curso (a) e desmoronamentos de solo ao longo dos rachões no solo (b) e em 2011 com a estabilização da rede de drenagem (c) e o desenvolvimento da cobertura vegetal (d)..... 93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características climáticas para o município de Iguatu, Ceará .....	32
Tabela 2 – Dados das análises físico-químicas do solo representativo das microbacias B1 e B2 .....	34
Tabela 3 – Dados das análises físico-químicas do solo da microbacia B3.....	35
Tabela 4 – Dados das análises físico-químicas do solo da microbacia B4.....	35
Tabela 5 – Condutividade hidráulica saturada para as microbacias experimentais B1, B2, B3 e B4 .....	36
Tabela 6 – Características morfométricas das microbacias B1, B2, B3 e B4, na estação experimental de Iguatu-CE .....	37
Tabela 7 – Características físicas das microbacias e cobertura ao longo do período estudado .....	42
Tabela 8 – Características físicas das parcelas, localização nas microbacias e cobertura ao longo do período estudado .....	47
Tabela 9 – Características físicas das parcelas de 1 m <sup>2</sup> , localização nas microbacias e cobertura vegetal.....	49
Tabela 10 – Valores mensais de precipitação e erosividade para as microbacias experimentais de Iguatu, período chuvoso de 2009, 2010 e 2011.....	54



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Específicos .....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>A erosão do solo e suas consequências.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Tipos de erosão hídrica do solo .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Escalas espaciais de mensuração da erosão e processos que operam nas diferentes escalas .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Conectividades no sistema e relações entre escalas espaciais.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5</b>	<b>Extrapolação dos dados das parcelas de erosão .....</b>	<b>28</b>
<b>3.6</b>	<b>Erosão, uso e conservação de solo.....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Área experimental .....</b>	<b>31</b>
4.1.1	Localização.....	31
4.1.2	Classificação climática.....	32
4.1.3	Solo.....	32
<b>4.2</b>	<b>Época e duração das coletas .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3</b>	<b>As unidades experimentais .....</b>	<b>36</b>
4.3.1	Microbacias monitoradas .....	37
4.3.2	Escoamento e erosão nas microbacias monitoradas.....	42
4.3.3	Parcelas de erosão de 20 m <sup>2</sup> .....	47
4.3.4	Parcelas de erosão de 1 m <sup>2</sup> .....	49
<b>4.4</b>	<b>Controle das condições físicas nas microbacias e parcelas.....</b>	<b>50</b>
<b>4.5</b>	<b>Análises de Sólidos Totais .....</b>	<b>50</b>
<b>4.6</b>	<b>Descarga Específica de Sedimento (DES) .....</b>	<b>51</b>
<b>4.7</b>	<b>Precipitação.....</b>	<b>52</b>
<b>4.8</b>	<b>Erosividade (EI<sub>30</sub>) da chuva.....</b>	<b>52</b>
<b>4.9</b>	<b>Umidade do solo.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>

<b>5.1</b>	<b>Características das chuvas.....</b>	<b>54</b>
<b>5.2</b>	<b>Escoamento superficial .....</b>	<b>58</b>
5.2.1	Área B1 (Caatinga nativa).....	58
5.2.2	Área B2 (raleamento da Caatinga) .....	59
5.2.3	Área B3 (desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho) .....	60
5.2.4	Área B4 (desmatamento/queimada/cultivo de <i>Andropogon gayanus</i> Kunt).....	62
5.2.5	Parcelas com solo nu .....	63
<b>5.3</b>	<b>Efeito da umidade antecedente do solo sobre o início do escoamento superficial para as diferentes escalas espaciais.....</b>	<b>65</b>
<b>5.4</b>	<b>Perdas de solo.....</b>	<b>67</b>
5.4.1	Área B1 (Caatinga nativa).....	67
5.4.2	Área B2 (raleamento da Caatinga) .....	71
5.4.3	Área B3 (desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho) .....	75
5.4.4	Área B4 (desmatamento/queimada/cultivo de <i>Andropogon gayanus</i> Kunt).....	78
5.4.5	Parcelas com solo nu .....	81
<b>5.5</b>	<b>Transferência de escala.....</b>	<b>85</b>
5.5.1	Comparações 20 m <sup>2</sup> / 1 m <sup>2</sup> .....	85
5.5.2	Comparações Microbacias/ 20 m <sup>2</sup> .....	88
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>94</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O semiárido do Nordeste do Brasil com uma população de cerca de 20 milhões habitantes tem exigido uma demanda crescente de produtos agrícolas e florestais, e um rápido incremento da produção agrícola, o qual tem sido feito à custa do desmatamento indiscriminado da Caatinga, com conseqüente degradação do solo pelo processo erosivo (hídrico ou eólico). Em decorrência do regime pluviométrico do semiárido brasileiro, com chuvas de alta intensidade, a erosão hídrica é a responsável pelas maiores perdas de solo.

A erosão é um fenômeno cujo impacto sobre os recursos naturais renováveis tem preocupado governos e instituições em diferentes partes do mundo. As questões relacionadas à erosão têm aumentado consideravelmente nos últimos anos, especialmente em regiões semiáridas de países como o Brasil, onde grande parte da população depende de atividades econômicas ligadas à agricultura.

Os efeitos negativos da erosão incluem perdas de matéria orgânica nos solos, redução da fertilidade dos solos e da sua capacidade de armazenamento de água, com conseqüente poluição e assoreamento dos corpos hídricos. Esses efeitos podem fundamentalmente levar a problemas sociais, tais como o abandono das terras e o declínio das comunidades rurais, cena extremamente marcante no nordeste brasileiro em períodos de secas, denominado de êxodo rural, que resultavam em maiores pressões populacionais nas grandes cidades e diversos outros problemas inerentes (desemprego, marginalização, prostituição e etc.). Dessa forma, é reconhecida a importância da proteção e do manejo do solo na redução das perdas de solo, e a necessidade de uma política ambiental com uma correta avaliação das reais taxas de erosão do solo e sua distribuição geográfica.

No cenário político, os impactos das atividades humanas sobre a erosão do solo tornaram-se uma grande preocupação, tanto relacionados aos eventos extremos que causam a maior parte da erosão dos solos, quanto a eventos de menor magnitude que também reduzem a produtividade agrícola e aumentam a poluição das águas. A expansão das fronteiras agrícolas vem resultando em mudanças amplas do uso da terra, e crescente preocupação com os impactos da erosão do solo. Em resposta ao aumento dos riscos de erosão, especialmente em terras agrícolas, grupos de pesquisa e

organizações políticas em todo o mundo, vêm promovendo o desenvolvimento e a implementação de técnicas de conservação de solo e água.

Na Europa, dados de erosão foram obtidos através de uma série de projetos de pesquisa baseados em várias tecnologias, incluindo diferentes usos do solo e experiências com chuva natural e simulada. A maioria dos dados foram coletados em escala de parcelas de erosão sob chuva natural, similar às utilizadas para a calibração e validação da Equação Universal de Perdas de Solo (Universal Soil Loss Equation - USLE). Embora o tamanho das parcelas, as metodologias, bem como a duração do período de estudo variem consideravelmente, estes dados de erosão apresentam uma riqueza de informações sobre as taxas reais de erosão na Europa. A Espanha, devido à sua elevada susceptibilidade ao processo erosivo, vêm investido maciçamente em pesquisas desde a década de 1980, fazendo dessa região uma referência mundial no entendimento de hidrologia e geomorfologia de ecossistemas semiáridos.

Em geral, os estudos relacionados ao processo erosivo hídrico ocorrem em parcelas experimentais nas mais diferentes dimensões. Dados relacionados a mensurações em campo, quase sempre, registram uma alta variabilidade espacial e temporal. Esta variabilidade pode ser parcialmente explicada pela dinâmica dos processos naturais, e em parte pelos distúrbios causados no desenvolvimento experimental e nas medições de campo.

O clima, litologia, solo (solos rasos), intensivo uso do solo e mudanças na cobertura, fazem com que o semiárido do Nordeste brasileiro apresente uma elevada vulnerabilidade à erosão hídrica, levando a excessivas perdas de nutrientes, matéria orgânica, e assoreamento acelerado dos reservatórios. Diversos pesquisadores em várias regiões do Brasil alertam para a escassez de dados e pesquisas de campo objetivando avaliar as perdas de solo (AGUIAR *et al.*, 2006; ALBUQUERQUE *et al.*, 2002; FRANCO *et al.*, 2002; RODRIGUES, 2009; SANTOS *et al.*, 2011).

Em regiões como o semiárido brasileiro, onde dados gerados em campo são muito escassos, é de primordial importância à obtenção de dados de erosão do solo em diferentes escalas espaciais. Esses dados possibilitam uma melhor análise das práticas atuais de uso do solo e contaminação dos corpos hídricos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Gerar dados básicos de escoamento, produção de sedimento e analisar os principais processos e fontes de variação na perda de solo em diferentes escalas espaciais em região semiárida, bem como os processos naturais atuantes em cada escala, e os efeitos do uso do solo na conservação do meio.

### **2.2 Específicos**

Mensurar a erosão e escoamento em diferentes escalas espaciais e coberturas vegetais no semiárido.

Avaliar o efeito de escala sobre o escoamento e produção de sedimentos para diferentes coberturas do solo e manejos mais empregados na região semiárida do Nordeste brasileiro.

Avaliar as relações de dependência das perdas de solo pelo escoamento.

Determinar os efeitos das variáveis relacionadas à erosão nas diferentes escalas estudadas, como chuva (intensidade, erosividade, volume total etc.), umidade antecedente do solo, cobertura vegetal e tipo de solo.

Servir como base para estudos futuros de erosão, de forma a auxiliar na escolha da escala de mensuração de acordo com o objetivo pré-estabelecido pela pesquisa.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 A erosão do solo e suas consequências

O solo constitui o ambiente físico em que ocorre a maioria das atividades humanas. É um recurso natural renovável, embora a velocidade de formação seja inferior à do processo erosivo. Esse fato é ainda mais evidente em regiões áridas e semiáridas, onde a taxa de formação do solo é quase nula (DESIR; MARÍN, 2007).

Segundo Bertoni e Lombardi Netto (1993) existem dois tipos de erosão: geológica, que é causada por fenômenos naturais tais como a chuva e o vento, que promovem contínuas mudanças na superfície terrestre; e acelerada, que é causada pela interferência do homem nesse processo de modificação da crosta terrestre podendo acelerar sua intensidade.

Os Estados Unidos é provavelmente o único país onde os dados de erosão foram coletados durante um longo período de tempo utilizando metodologia padronizada (CERDAN *et al.*, 2010). Na Europa, os dados de erosão foram coletados através de uma série de projetos de investigação baseados em várias metodologias, sendo a maioria dos dados coletados em campo em parcelas de erosão sob chuva natural, comparáveis às utilizadas nos Estados Unidos e esses dados apresentam uma riqueza de informações sobre as reais taxas de erosão (CERDAN *et al.*, 2010).

Renschler e Harbor (2002) definem a erosão do solo como a translocação de partículas do solo por processos relacionados ao clima, topografia, solo e vegetação. A erosão do solo é o desgaste da superfície da terra por parte das forças físicas, tais como chuva, fluxo de água, vento, gelo, as mudanças de temperatura, a gravidade ou outros agentes naturais ou antropogênicos que desagregam e removem o solo ou material geológico de um ponto sobre a superfície da terra e o deposita em outra parte (VERHEIJEN *et al.*, 2009).

Dessa forma, a erosão do solo é um processo físico, onde ocorre trabalho, no sentido de consumo de energia. Essa energia é empregada em todas as fases da erosão: no salpicamento das partículas, no rompimento dos agregados do solo (ou

desagregação), na turbulência da enxurrada, e no fluxo e transporte das partículas (BERTONI e LOMBARDI NETTO, 1993). A desagregação é definida como a liberação de partículas dos agregados, e é provocada especialmente pelo impacto das gotas da chuva diretamente sobre a superfície do solo que, uma vez desprendidas, podem permanecer próximas ao agregado ou serem transportadas (CARVALHO *et al.*, 2002). O transporte ou arraste das partículas finas desagregadas se dá quando o solo está saturado ou quando a intensidade da chuva é superior à taxa de infiltração de água no solo, ocasionando o início do escoamento superficial (INÁCIO *et al.*, 2007). No estágio final do processo, a deposição das partículas, normalmente culmina em locais mais baixos, que podem ser depressões naturais do terreno ou em corpos hídricos como rios, lagos e açudes.

Os efeitos negativos da erosão do solo incluem a redução da fertilidade do solo, redução da sua capacidade de armazenamento de água, perdas de matéria orgânica, poluição da água, assoreamento (BAKKER *et al.*, 2004; CERDAN *et al.*, 2010), aumento do risco de desertificação, destruição das nascentes, modificação da calha dos rios pelo desmoronamento e deposição de sedimentos no leito, formação de sulcos indesejáveis no terreno e poluição dos corpos hídricos provocando aumento da turbidez na água (CARVALHO, 2008). Todos esses pontos negativos podem fundamentalmente levar a desafios sociais, tais como o abandono das terras e o declínio das comunidades rurais (BAKKER *et al.*, 2005).

### **3.2 Tipos de erosão hídrica do solo**

No Brasil, um dos fatores de desgaste que mais seriamente tem contribuído para a improdutividade dos solos é sem dúvida a erosão hídrica facilitada e acelerada pelo homem, com práticas agrícolas inadequadas (BERTONI e LOMBARDI NETTO, 1993).

A erosão hídrica é definida como um processo complexo que se manifesta em intensidade variável, dependendo da importância relativa do clima, solo, topografia, vegetação, uso do solo e práticas conservacionistas. Os agentes determinantes do

processo de erosão hídrica são a precipitação pluvial e o escoamento superficial, os quais promovem o desalojamento, transporte e deposição das partículas do solo (SCHÄFER *et al.*, 2001).

A classificação da erosão hídrica em três principais formas (laminar, em sulcos e em voçorocas) é consenso entre os pesquisadores da área (BERTONI e LOMBARDI NETTO, 1993; SCHÄFER *et al.*, 2001; CAVICHIOLO, 2005). Destaca-se que as mesmas podem ocorrer isoladamente ou simultaneamente no mesmo terreno.

Erosão laminar é caracterizada por remover camadas superficiais delgadas de solo devido ao fluxo da enxurrada, arrastando primeiramente as partículas mais leves de solo predominantemente em suspensão. Esta forma de erosão é de difícil percepção, sendo que, em estágios avançados além do abaixamento da superfície, podem-se observar áreas de coloração mais clara e afloramento de raízes das plantas perenes, bem como a formação de patamares nas gramíneas.

Erosão em sulco caracteriza-se pela formação de sulcos em pequenas irregularidades do terreno, onde a enxurrada se concentra atingindo volume e velocidade suficientes para escavá-lo. É ocasionada por chuvas de alta intensidade, em terrenos íngremes e com longas vertentes e solos de alta erodibilidade.

Erosão na forma de voçorocas é ocasionada por grandes concentrações de enxurrada que passam, ano após ano, no mesmo sulco em solos profundos. Tal fato resulta em um elevado deslocamento de grandes massas de solo com a formação de grandes cavidades em extensão e profundidade.

Dados de perda de solo coletados em diferentes partes do mundo mostram que as taxas de perda de solo por erosão em voçorocas representam um mínimo de 10% e um máximo de 94% da produção total de sedimentos causados pela erosão hídrica (POESEN *et al.*, 2003).

### **3.3 Escalas espaciais de mensuração da erosão e processos que operam nas diferentes escalas**

Uma das restrições importantes para medir a erosão do solo por meio de parcelas de terreno envolve a escala espacial, a qual é importante quando se busca obter



uma representação real do funcionamento natural de um ecossistema (BOIX-FAYOS *et al.*, 2007). De Vente e Poesen (2005) e Puigdefábregas (2005) explicam como os processos hidrológicos que controlam o desprendimento, transporte e deposição de sedimentos apresentam uma forte dependência da escala.

Através de uma ampla gama de escalas ( $10^{-6}$  a  $10^5$  km<sup>2</sup>), De Vente e Poesen (2005) sintetizam a erosão hídrica de diferentes processos em curso. Em geral, com maior área de drenagem é esperado um aumento na produção de sedimentos específica, isso se torna possível devido aos adicionais processos de erosão no rio, erosão das margens, e movimento de massa. No entanto, a partir de certo limiar de área da bacia, a produção de sedimentos torna-se dominado pelo transporte e deposição de sedimentos e não por processos de erosão ativa. A partir desse limiar a razão de aporte de sedimentos diminui com o aumento da área da bacia. O valor da produção de sedimentos e do limiar é determinado pelas condições locais, tais como topografia, litologia, e cobertura vegetal. No entanto, as variações na perda de solo avaliada em medições de parcelas são elevadas porque condições locais podem variar fortemente. Em condições extremas (por exemplo, alta erodibilidade, baixa cobertura vegetal e elevada intensidade de precipitação), uma alta produção de sedimentos pode ocorrer em nível das parcelas.

Os processos dominantes e de controles em escalas de parcela de erosão, em condições semiáridas temperado, descrito por Cammeraat (2002), mostram muitas semelhanças com os descritos por Calvo-Cases *et al.* (2003). Esses autores descrevem como a melhoria de algumas propriedades do solo, por exemplo, teor de matéria orgânica e agregados estáveis, resultam numa maior disponibilidade de água. Isso favorece a uma ação de controle cada vez mais efetiva de fatores como cobertura vegetal e matéria orgânica do solo, sobre os processos erosivos. Além disso, tem sido observado que na escala de encosta a cobertura vegetal e o teor de matéria orgânica, são os fatores mais importantes que controlam os processos de escoamento e agregação do solo.

Para áreas de drenagem entre pequenas bacias e grandes bacias ( $> 10$  km<sup>2</sup>), o efeito de sumidouros de sedimentos (deposição) muitas vezes torna-se dominante em relação às fontes de sedimentos, resultando em um declínio gradual na razão de aporte de sedimentos (BOIX-FAYOS *et al.*, 2007). Isto é o que define uma mudança no sistema limitado pela erosão para um sistema limitado pelas condições de transporte. Assim, quanto maior a área, maior a probabilidade de deposição de sedimentos no

caminho, que pode até resultar em menor rendimento de sedimentos na bacia tomada em comparação com as taxas de erosão medidos no local, em parcelas de erosão.

No entanto, essa relação nem sempre é válida, as características que tendem a intensificar os processos erosivos, de um modo geral podem reduzir a produção de sedimentos em uma situação específica. Exemplo disso é o comprimento de rampa, que tem uma relação direta com a formação de canais e voçorocas e, portanto, com a erosão. Em região semiárida, onde o principal processo de geração de escoamento é Hortoniano (em que a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração), vertentes longas aumentam a possibilidade de infiltração do escoamento gerado a montante, aumentando também a probabilidade de deposição dos sedimentos por diminuição do fluxo de transporte (MEDEIROS, 2009).

Poesen *et al.* (2003) relatam que resultados de pesquisas obtidas em 22 bacias espanholas, indicam claramente que a produção específica de sedimento em escala de bacia aumenta quando aumenta a frequência de voçorocas. Para bacias onde não foram observadas voçorocas, a média de produção específica de sedimento foi de  $0,74 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Bacias com apenas algumas voçorocas, tiveram uma intermediária produção média de sedimentos, no valor de  $2,97 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Já para bacias onde numerosas voçorocas foram observadas, a média de produção específica de sedimento foi maior, na ordem de  $9,61 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Em outras palavras, a presença de voçorocas nessas bacias do Mediterrâneo parece ser um indicador importante para a produção de sedimentos dentro dessas bacias.

Assim, a escala espacial em estudos da degradação da terra, pode influenciar a interpretação dos resultados coletados (FITZJOHN *et al.*, 2002). Os dados de campo sobre a erosão do solo em diferentes escalas espaciais, no entanto, não são abundantes na literatura (BAGARELLO e FERRO, 2004). As medições de campo têm se concentrado na erosão hídrica em escala de parcelas de escoamento.

### 3.4 Conectividades no sistema e relações entre escalas espaciais

Segundo Fryirs *et al.* (2007), conectividade pode ser definida como a transferência de energia e matéria entre dois compartimentos topográficos ou dentro de um sistema como um todo.

De acordo com Medeiros (2009) outros autores citam diferentes conceitos de conectividade de acordo com áreas específicas de conhecimento, como se segue:

- Biologia: “o grau em que a topografia facilita ou impede o movimento de indivíduos”;
- Hidrologia: “transferência de matéria, energia e/ou organismos dentro ou entre elementos do ciclo hidrológico, tendo a água como meio de transporte”;
- Sedimentologia: “transferência de sedimento de um local para outro e o potencial de uma partícula específica de se mover internamente no sistema”. Esse conceito é implicitamente considerado em abordagens empíricas sobre produção de sedimentos, como a “razão de aporte de sedimentos” (*Sediment Delivery Ratio* – SDR).

A conectividade hidrológica é um termo freqüentemente usado para descrever as relações internas entre o escoamento e a produção de sedimentos nas partes altas e baixas das bacias hidrográficas. Cammeraat (2004, 2002) associa a conectividade hidrológica principalmente às características da precipitação pluviométrica (intensidade, duração e frequência), mas também destaca a existência de limites controlados por condições físicas e biológicas da bacia. Por exemplo, escoamento gerado uniformemente por saturação do solo produz elevada conectividade da bacia, enquanto que excessos de precipitação, em decorrência de chuvas de baixa intensidade, têm maior probabilidade de infiltrar, conferindo baixa conectividade. O autor supracitado demonstrou que para regiões semiáridas na Espanha, com base em medidas realizadas em campo, as condições críticas para geração de escoamento são muito distintas nas diferentes escalas: enquanto que na pequena escala eventos chuvosos pequenos, de curta duração, porém com intensidade moderada, são capazes de gerar escoamento; em escalas maiores a resposta da bacia é extremamente dependente da intensidade da chuva e de uma duração mínima que permita a conexão das encostas com a rede de drenagem. De um modo geral, os limites a serem ultrapassados para a ocorrência de escoamento superficial aumentam com a escala espacial.

Ao medir os processos de erosão relacionados em pequenas parcelas de erosão, especialmente parcelas fechadas, a conectividade do sistema está quebrada, ou pelo menos a conectividade da encosta como um todo não é refletida. É por isso que os resultados de pequenas parcelas de superfícies erodíveis (fontes de escoamento e sedimentos) não são adequados na extrapolação para escalas de bacias. Embora as medições em pequenas parcelas não reflitam a conectividade do sistema, elas são úteis para a compreensão do comportamento dos processos dentro de uma superfície homogênea (BOIX-FAYOS *et al.*, 2005).

A quebra da conectividade do sistema em parcelas de erosão fechadas é relatada por Ollesch e Vacca (2002). Estes autores mostraram que as parcelas de erosão fechadas reduzem suas taxas de erosão ao longo de um período de seis anos, devido principalmente às condições limitadas de transporte de sedimentos disponíveis. Parcelas de erosão fechadas após vários anos de funcionamento podem resultar no esgotamento do material disponível para o desprendimento do solo. Isso devido à criação de uma camada resistente, sobre a superfície do solo, e à falta da entrada de material transportado de áreas externas à parcela. Boix-Fayos *et al.* (2007) também observaram este esgotamento de material em parcelas de erosão delimitadas, embora esta seja mais provável de acontecer em solos naturais não cultivados com nenhuma atividade de manejo, onde eles recomendam o uso de parcelas em aberto. Uma vantagem de parcelas fechadas é que elas permitem a comparação das diferentes respostas hidrológicas na mesma escala espacial, com exatamente o mesmo tamanho de área de drenagem.

Outro fator que influencia a conectividade é a rugosidade da superfície, que se destaca de maneira diferente de acordo com a escala. Nas menores escalas, a microtopografia é um fator importante, enquanto que na escala de vertente a rugosidade pode ser representada por sulcos decorrentes do tratamento do solo para agricultura ou pela formação de ravinas. Nesses casos, valas paralelas ao sentido do escoamento tendem a aumentar a conectividade, enquanto que canais no sentido perpendicular favorecem a infiltração (CAMMERAAT, 2004).

### 3.5 Extrapolação dos dados das parcelas de erosão

A extrapolação dos resultados de parcelas experimentais para bacias hidrográficas na maioria dos casos resulta em uma superestimativa da erosão (POESEN *et al.*, 2003). Le Bissonais *et al.* (1998) determinaram relações entre escala para as perdas de solo, encontrando valor de aproximadamente 2 para a razão entre as perdas de solo em parcela de 20 m<sup>2</sup> sobre as perdas em parcelas de 1 m<sup>2</sup>, e valor aproximado de 0,5 para a razão entre escala de parcela 500 m<sup>2</sup> sobre 20 m<sup>2</sup>. As parcelas de 1 m<sup>2</sup> apresenta menores perda de solo e água, comparado com as parcelas de 20 m<sup>2</sup>, devido à menor velocidade do fluxo e da limitada capacidade de transporte. Enquanto que em parcelas de 20 m<sup>2</sup> as perdas de solo são maiores comparadas com as parcelas de 500 m<sup>2</sup>, devido, principalmente, ao aumento da probabilidade da presença de uma rota preferencial de infiltração com o crescimento do tamanho da parcela.

Se as parcelas são pequenas, de acordo com Chaplot e Le Bissonais (2000), que utilizaram lotes de 1 a 10 m<sup>2</sup>, a erosão e o transporte são limitados pelo impacto das gotas da chuva e a reduzida velocidade de fluxo. Assim, os dados de perdas de solo obtidas em escala de parcelas são difíceis de extrapolar ao nível da bacia, porque a heterogeneidade de uma bacia hidrográfica é sempre maior que a de uma parcela (BOIX-FAYOS *et al.*, 2007). Por outro lado, os estudos em escala de parcelas são importantes, tendo em vista o fornecimento de informações da quantidade de solo agrícola que será deslocado. O conhecimento da quantidade de solo deslocado de áreas agrícolas é de fundamental importância, pois esse processo resulta no empobrecimento dos campos, redução de armazenamento de água e potencial de poluição dos corpos hídricos (CERDAN *et al.*, 2010).

Devido à predominância de diferentes processos e condições limitantes ao transporte de sedimentos em escalas específicas, é impossível a transferência direta de dados de perda de solo de maneira linear entre escalas (CAMMERAAT, 2002). Assim, uma adequada descrição dos fluxos de sedimentos para a adoção de medidas preventivas ou de controle dos processos erosivos requer um entendimento não somente dos fatores que influenciam a erosão, como também das condições de transporte de sedimentos (MEDEIROS, 2009).

### 3.6 Erosão, uso e conservação de solo

A erosão em áreas agricultáveis, resultante da combinação de fatores antrópicos e somadas às condições naturais desfavoráveis do solo, tem acelerado o processo de empobrecimento e degradação das terras. Cultivos agrícolas nem sempre adotam medidas de conservação do solo como estratégias de gestão agrícola, resultando em queda da fertilidade e produtividade em consequência da erosão acelerada do solo (BARTON *et al.*, 2004). É evidente que soluções de baixo custo para os problemas da erosão são necessárias para manter os recursos do solo e garantir a produção agrícola eficiente em longo prazo, e promover um eficiente uso da terra. Assim, precisa-se avaliar a eficácia de várias medidas de conservação agronômicas e de manejo do solo. A

FAO (1967) admite perdas de solo máximas da ordem de 12,5 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, para solos profundos, permeáveis e bem drenados; 2 a 4 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para solos rasos ou impermeáveis e, para outros solos, admite perdas intermediárias àqueles limites.

Muitas pesquisas de erosão do solo no SE Espanha, na escala de encosta, nos últimos cinco anos tem se concentrado sobre o efeito do uso do solo e técnicas de manejo sobre o escoamento e erosão do solo (VAN WESEMAEL *et al.*, 2006;. MARTÍNEZ-MENA *et al.*, 2008;. CERDÀ *et al.*, 2009).

Segundo Puigdefábregas (2005), é amplamente aceito que o escoamento superficial e a produção de sedimentos diminuem com o aumento da cobertura vegetal. Esta relação é utilizada para formalizar o efeito da vegetação em modelos de erosão.

Em estudos dos impactos gerados por distintos uso da terra sobre o processo erosivo em pequenas bacias rurais cultivadas, Gafur *et al.* (2003) constataram a forte influência da intervenção antrópica sobre a produção de sedimentos em Bangladesh. As microbacias estudadas pelos supracitados autores foram propositalmente alteradas, com tratamento de corte e queima da vegetação, onde se constatou profundas mudanças no comportamento hidrológico e na produção de sedimentos nas unidades monitoradas. Os autores sugerem que o escoamento superficial anual, no ano com tratamento de corte, queima e cultivo foi incrementado em 16%, enquanto que, o escoamento direto anual de pequenas bacias hidrográficas a longo prazo de pousio e/ou vegetação perene varia normalmente entre 15 e 24% da precipitação anual.

Um estudo desenvolvido na Bélgica para avaliar os efeitos das práticas conservacionistas no escoamento superficial e nas perdas de solo sob condições do ocidente europeu, utilizaram durante cinco anos simulação de chuva. Mais de 150 experiências de simulação de chuva em pequenas parcelas foram realizadas em campos com milho, beterraba e trigo. Estas experiências mostraram uma redução das perdas de solo e do escoamento sob práticas de preparo conservacionistas, com redução em média de 63% e 88%, respectivamente, com relação aos valores medidos em parcelas convencionalmente aradas (LEYS *et al.*, 2007).

Uma prática bastante comum que pode contribuir para maiores perdas de solo por erosão hídrica, além de interferir na fertilidade do solo, é o uso do fogo. Efeitos da disposição dos resíduos sobre o terreno e uso do fogo foram avaliados por Fernández *et al.* (2004) obtendo valores de perdas de solo de  $2,04 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para as áreas enleiradas com queima,  $1,76 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  onde o resíduo foi espalhado sobre a área e queimado, enquanto que para os tratamentos sem queima as perdas são bem inferiores a estes valores, ficando em torno de  $0,02 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Os autores relatam que, de modo geral, todas as técnicas empregando fogo geraram maiores perdas de solo.

Já no sertão Paraibano, no município de Sumé, Santos *et al.*, (2007), trabalhando com chuva natural no período de 1983 a 1991, encontraram perdas anuais médias de solo de 33,2 a  $52,1 \text{ t ha}^{-1}$  para duas áreas desmatadas,  $0,3 \text{ t ha}^{-1}$  para áreas mantidas com cobertura rasteira e cobertura morta e  $0,2 \text{ t ha}^{-1}$  para a área de Caatinga nativa.

Em áreas agrícolas, as intervenções antrópicas afetam diretamente o movimento do solo através de atividades como plantio direto, manejo e colheita das culturas, pisoteio do solo e remoção da vegetação pelo pastejo (RENSCHLER E HARBOR, 2002). Essas práticas modificam a estrutura do solo e favorecem o processo erosivo.

Santos *et al.* (2011), avaliando as perdas de água e solo em uma parcela de erosão com cobertura herbácea nas bacias experimentais do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia no município de Iguatu-CE, no período chuvoso de 2009, encontraram perdas mensais de água que variaram de 22,6 a 43,9% da precipitação e perdas de solo mensal que variaram  $0,1$  a  $0,8 \text{ t ha}^{-1}$ , totalizando uma perda anual de  $2,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área experimental

#### 4.1.1 Localização

A área de estudo está localizada no Semiárido Cearense, na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe no município de Iguatu, em quatro microbacias experimentais pertencentes ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Iguatu. A área experimental está localizada entre as coordenadas geográficas  $6^{\circ}23'36''$  a  $6^{\circ}23'57''$  S e  $39^{\circ}15'15''$  a  $39^{\circ}15'30''$  W, com altitude média de 217,8 m (Figura 1).

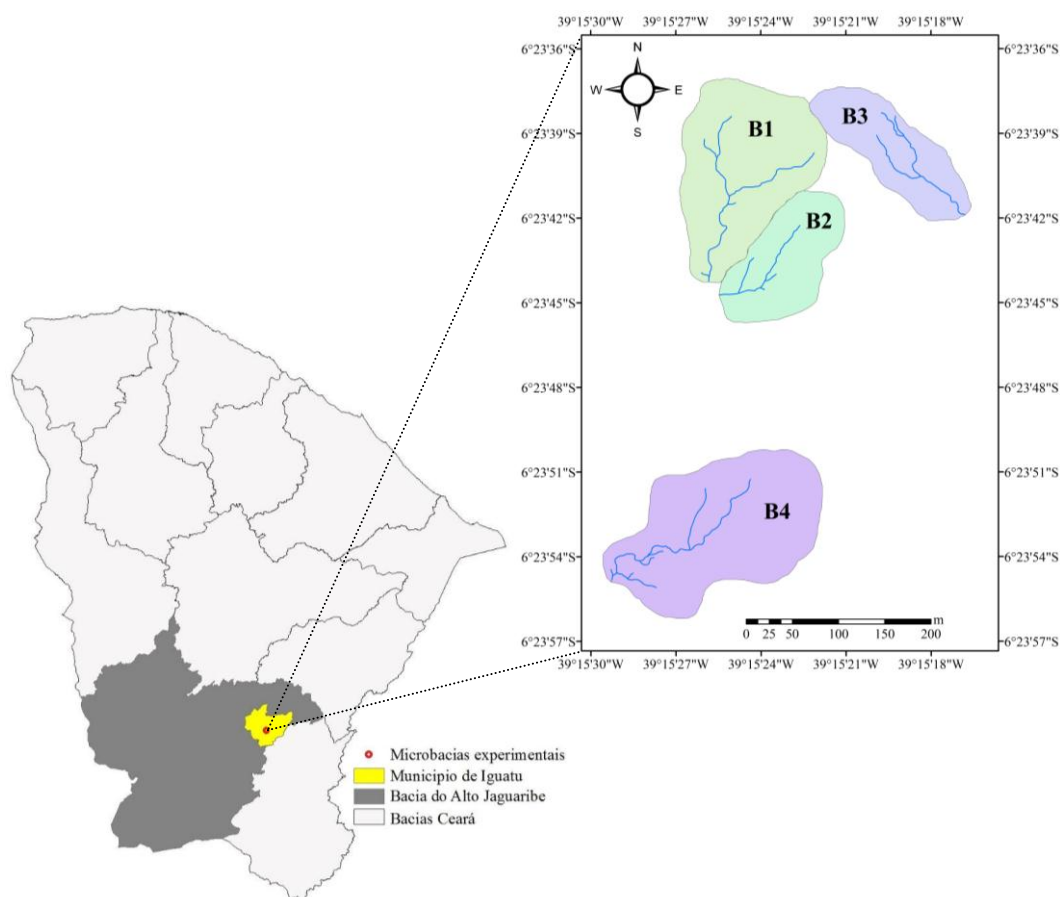


Figura 1 – Localização da área em estudo no Estado do Ceará, Brasil.



#### 4.1.2 Classificação climática

O clima da região é do tipo BSw'h' (Semiárido quente), de acordo com a classificação climática de Köppen, com temperatura média sempre superior a 18 °C no mês mais frio. A precipitação média histórica no município de Iguatu é de  $867 \pm 304$  mm, com 85% concentradas no período de janeiro-maio e dos quais cerca de 30% são registrados no mês de março (AGRITEMPO, 2011). A evaporação potencial média fica em torno de 1988 mm.ano<sup>-1</sup>. Demais características climáticas da região podem ser visualizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características climáticas para o município de Iguatu, Ceará

Variável	Valor	Unidade
Precipitação pluviométrica média	867	mm ano <sup>-1</sup>
Temperatura máxima média	31,7	°C
Temperatura mínima média	20,3	°C
Radiação solar média anual	5,63	kWh m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
Insolação média	2897,6	h ano <sup>-1</sup>
Umidade relativa média do ar	61,8	%
Evaporação média	1988	mm ano <sup>-1</sup>
Velocidade média do vento	2,1	m s <sup>-1</sup>

#### 4.1.3 Solo

Para classificação do solo foram abertas três trincheiras, a primeira representativa das microbacias B1 e B2, por serem adjacentes (Figura 2a), a segunda representativa da B3 (Figura 2b) e a terceira da B4 (Figura 2c). Os solos das microbacias B1, B2 e B4 foram classificados como Vertissolo Ebânico Carbonático Típico e o da microbacia B3 como Luvisolo Crômico Carbonático Típico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

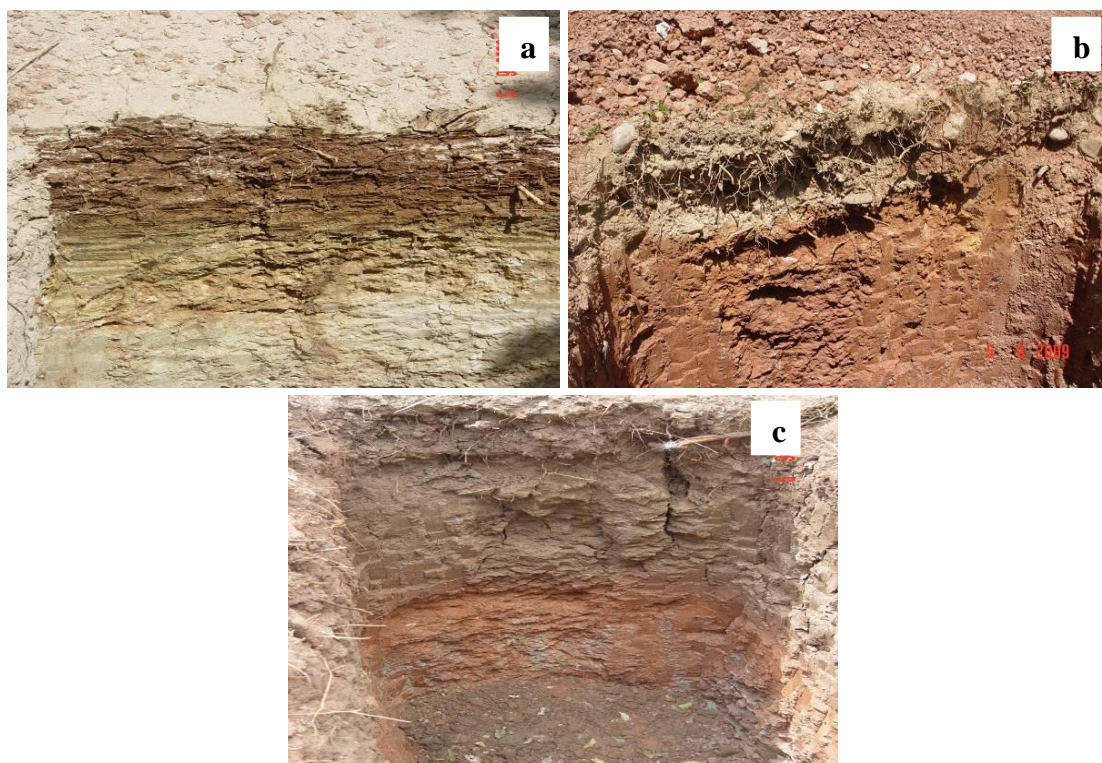


Figura 2 – Perfil do solo das microbacias estudadas, microbacia B1 e B2 (a), microbacia B3 (c) e microbacia B4 (c).

O relevo é pouco acidentado, com solos relativamente profundos com presença elevada de silte nas camadas superficiais e subsuperficiais. Devido ao tipo de argila presente nos solos das microbacias, é comum o surgimento de rachaduras na superfície nas épocas secas do ano, e encharcamento no período chuvoso, conforme averiguações de Alves (2008), tornando-se a área de difícil acesso e locomoção (Figura 3).



Figura 3 – Detalhe da estrutura do solo com formação de fendas (a) e acesso à área no período chuvoso (b).

A partir de amostras coletadas nas trincheiras para cada horizonte realizou-se a caracterização físico-química do solo (Tabelas 2 a 4). As análises foram realizadas nos Laboratórios de Física e Química do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará. Já a condutividade hidráulica saturada (Tabela 5) foi determinada em campo empregando-se um permeâmetro de carga constante conhecido como Amoozemetero, como descrito por Rodrigues (2009).

Tabela 2 – Dados das análises físico-químicas do solo representativo das microbacias B1 e B2

Horizonte	A	B	BCv
Profundidade (cm)	0 – 5	5 – 21	21 – 31
<b>Parâmetros físicos</b>			
Granulometria ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
Areia	137	205	182
Silte	447	405	470
Argila	416	390	348
Classe textural	Argilo siltoso	Franco argilo siltoso	Franco argilo siltoso
<b>Parâmetros químicos</b>			
C ( $\text{g kg}^{-1}$ )	24,10	13,30	10,20
Cálcio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	35,00	43,00	39,00
Magnésio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	12,00	10,00	8,60
Sódio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	0,13	0,13	0,15
Potássio ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	1,04	0,37	0,29

Tabela 3 – Dados das análises físico-químicas do solo da microbacia B3

Horizonte	A	B	BC
Profundidade (cm)	0 – 33	33 – 55	55 – 148
Parâmetros físicos			
Granulometria ( $\text{g kg}^{-1}$ )			
Areia	778	428	511
Silte	182	420	357
Argila	40	152	132
Classe textural	Areia franca	Franca	Franca
Parâmetros químicos			
C ( $\text{g kg}^{-1}$ )	13,75	4,95	2,56
Cálcio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	5,81	11,21	12,24
Magnésio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	3,22	9,62	13,22
Sódio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	0,08	1,16	2,92
Potássio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	0,19	0,13	0,45

Tabela 4 – Dados das análises físico-químicas do solo da microbacia B4

Horizonte	A	B1	B2	C1
Profundidade (cm)	0 – 25	25 – 103	103 – 116	116 – 137
Parâmetros físicos				
Granulometria ( $\text{g kg}^{-1}$ )				
Areia	315	291	166	322
Silte	425	387	502	478
Argila	260	322	332	200
Classe textural	Franca	Franco argilosa	Franco argilo siltosa	Franca
Parâmetros químicos				
C ( $\text{g kg}^{-1}$ )	8,31	5,75	5,44	3,86
Cálcio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	18,00	20,00	18,00	20,80
Magnésio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	15,20	12,40	10,00	14,20
Sódio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	0,81	1,42	3,37	5,32
Potássio ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )	0,21	0,19	0,23	0,21

Tabela 5 – Condutividade hidráulica saturada para as microbacias experimentais B1, B2, B3 e B4

Microbacia	Profundidade (cm)	
	0-30	30-60
	Condutividade hidráulica saturada - $K_{sat}$ ( $\text{mm h}^{-1}$ )	
B1	0,20	nda
B2	0,25	0,15
B3	6,50	0,44
B4	0,18	0,22

Fonte: Rodrigues (2009)

nda – Dado não disponível

#### 4.2 Época e duração das coletas

O estudo ocorreu durante os anos de 2009, 2010 e 2011, com chuvas concentradas de janeiro a junho, correspondendo à estação chuvosa da região. As coletas para quantificação do volume escoado superficialmente e de amostras para determinação da perda de sedimentos e nutrientes foram realizadas a cada evento de chuva erosiva (que geraram escoamento superficial), no acumulado de 24 horas.

#### 4.3 As unidades experimentais

Os estudos de erosão e escoamento superficial foram conduzidos em três níveis de escala: microbacias com áreas em torno de 1 a 3 ha, parcelas de erosão de 20  $\text{m}^2$  e parcelas de 1  $\text{m}^2$ , todas sob condições de chuvas naturais. Ao todo, foram instaladas quatro microbacias experimentais, seis parcelas de erosão de 20  $\text{m}^2$  e seis parcelas de 1  $\text{m}^2$ .

### 4.3.1 Microbacias monitoradas

Na Tabela 6 são apresentadas as características morfométricas das unidades experimentais, denominadas de B1, B2, B3 e B4.

Tabela 6 – Características morfométricas das microbacias B1, B2, B3 e B4, na estação experimental de Iguatu-CE

Características	Microbacias				Unid.
	B1	B2	B3	B4	
Área	2,06	1,15	1,19	2,80	ha
Perímetro	594,50	478,35	491,75	696,75	m
Comprimento do talvegue (Lt)	183,87	120,54	142,80	187,90	m
Comprimento do curso principal (Lcp)	252,11	147,18	150,30	238,20	m
Comprimento da bacia (Lb)	204,40	188,17	208,50	253,90	m
Declividade média da bacia (Db)	10,59	8,72	10,63	5,57	%
Fator de forma (Rf)	0,49	0,32	0,27	0,43	-
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,16	1,25	1,26	1,17	-
Tempo de concentração (Tc)	33,80	20,00	30,00	27,50	min
Sinuosidade do curso principal (Sin)	1,40	1,20	1,05	1,27	-

O levantamento planialtimétrico foi conduzido pelo emprego de um Taqueômetro ou Estação Total, com medições de ângulos horizontais, verticais e distâncias. O equipamento empregado refere-se a uma estação total LEICA modelo TC407. O ponto inicial de entrada foi coletado com GPS diferencial SR20 LEICA, com datum WGS 84 sistema de coordenadas UTM, e os demais foram levantados e corrigidos a partir deste. O pós-processamento foi conduzido através do software tope AVN, cujo arquivo foi convertido para formato ASCII e processado no Arcmap 9.2, em que se confeccionou o Modelo Numérico do Terreno (MNT) das microbacias (Figura 4 a, b e c). Os mapas de classes de declividade foram separados em seis intervalos distintos, sugeridos pela Embrapa (1979), conforme mostrado nos mapas da Figura 5abcd.

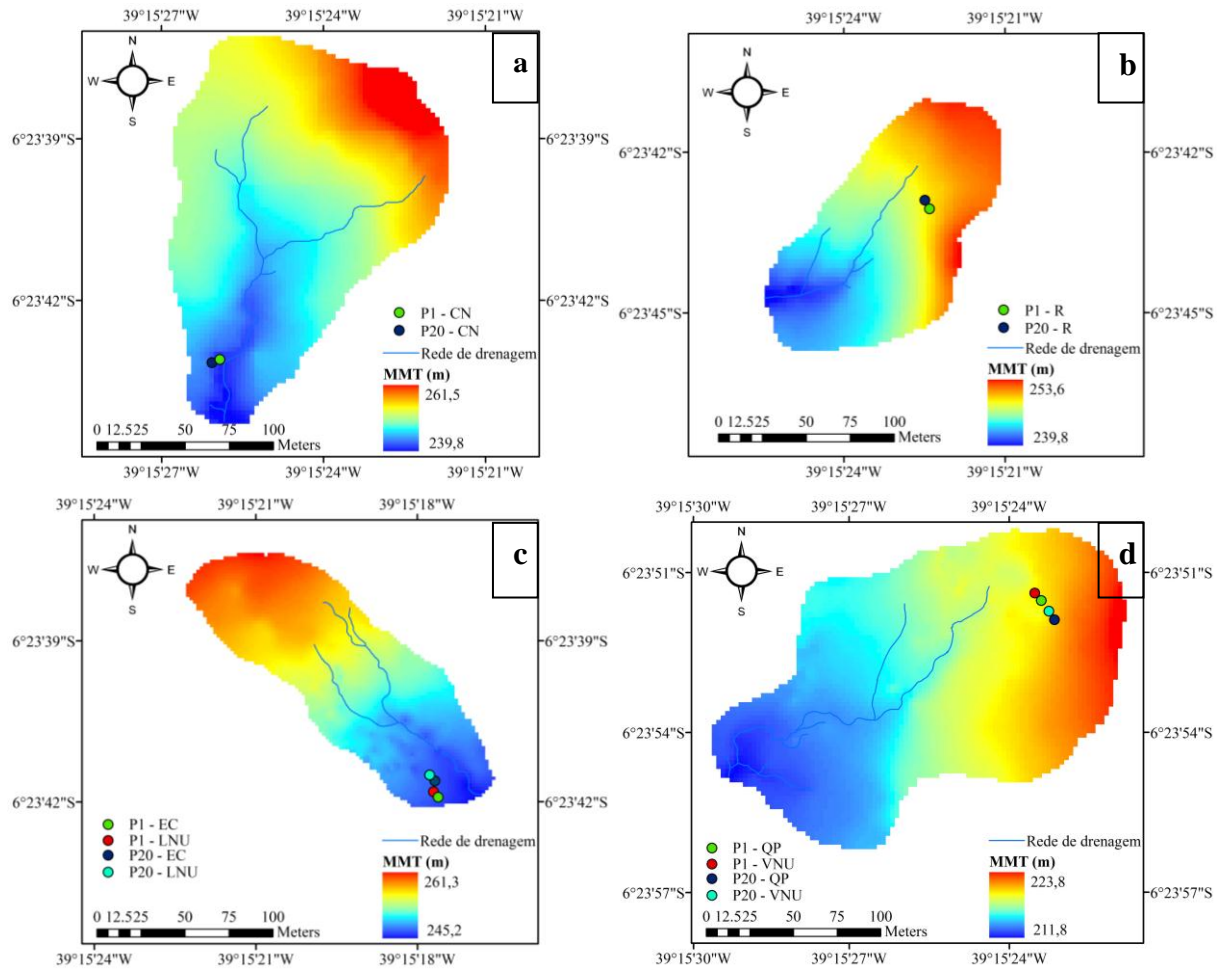


Figura 4 – Modelo numérico das microbacias (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 e localização das parcelas experimentais de erosão.

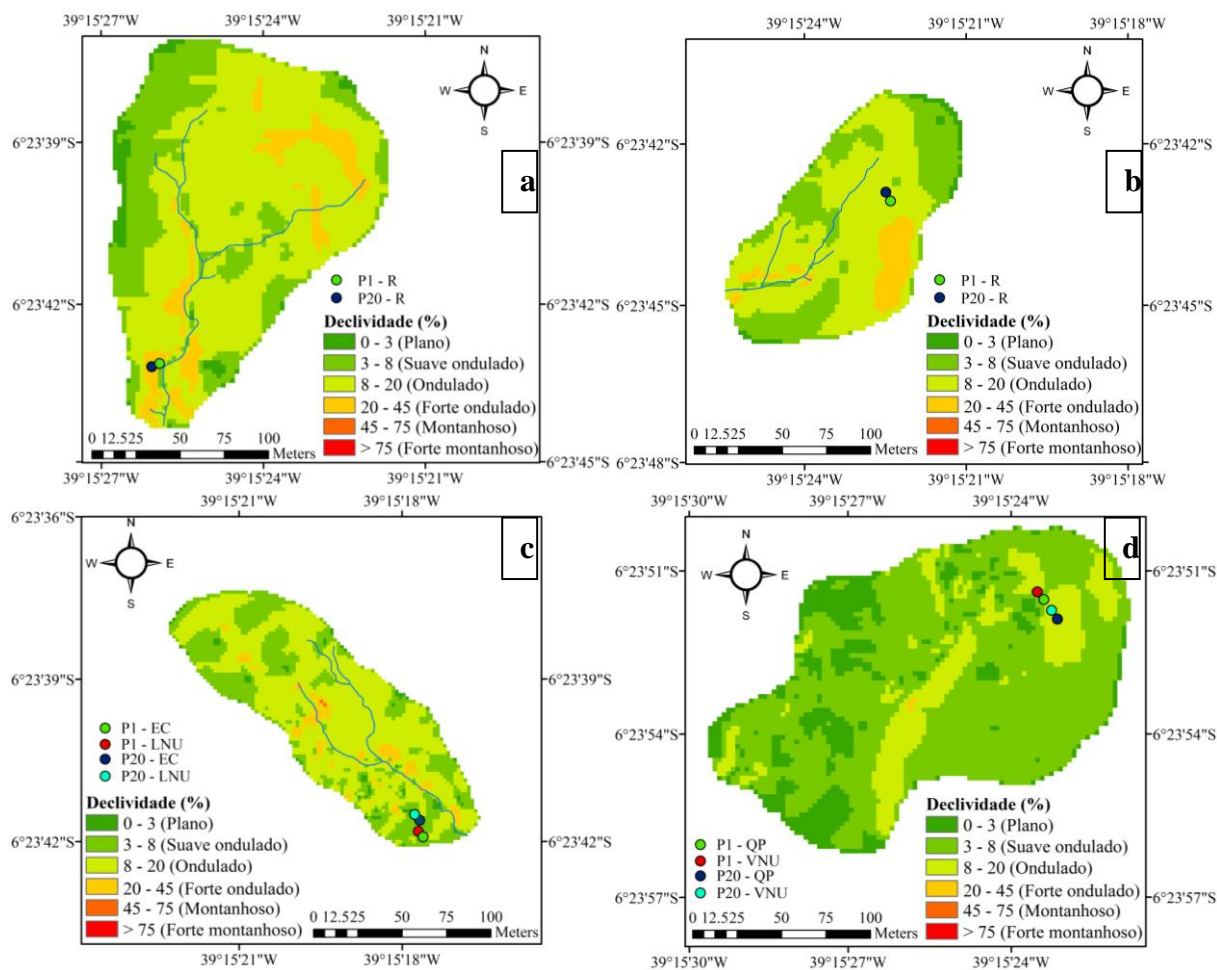


Figura 5 – Distribuição das classes de declividade das microbacias (a) B1, (b) B2, (c) B3, (d) B4 e localização das parcelas experimentais de erosão.

A microbacia B1 foi mantida durante todo o período de estudo com cobertura vegetal composta de Caatinga Nativa (Figura 6). Durante o primeiro ano de estudo, 2009, três das microbacias (B1, B3 e B4) foram mantidas com a vegetação nativa de caatinga na condição original da região. A composição da vegetação é tipicamente Caatinga. Segundo Lopes (2008), a área apresenta uma vegetação relativamente conservada, sendo enquadrada como caatinga arbustivo-arbórea fechada, mas apesar de apresentar uma boa cobertura vegetal na maior parte da área de estudo, em algumas partes são observadas áreas com ausência de vegetação ou com vegetação de menor porte. A vegetação da microbacia B1 (Caatinga nativa) apresenta uma caatinga fechada cobrindo totalmente o solo no período chuvoso, com isso permite pouco desenvolvimento do estrato herbáceo. Cabe salientar que a vegetação perde suas folhas durante o longo período de estiagem da estação seca. Este fato faz com que no início da estação chuvosa, ocorra uma alteração das respostas hidrológicas (Figura 6).



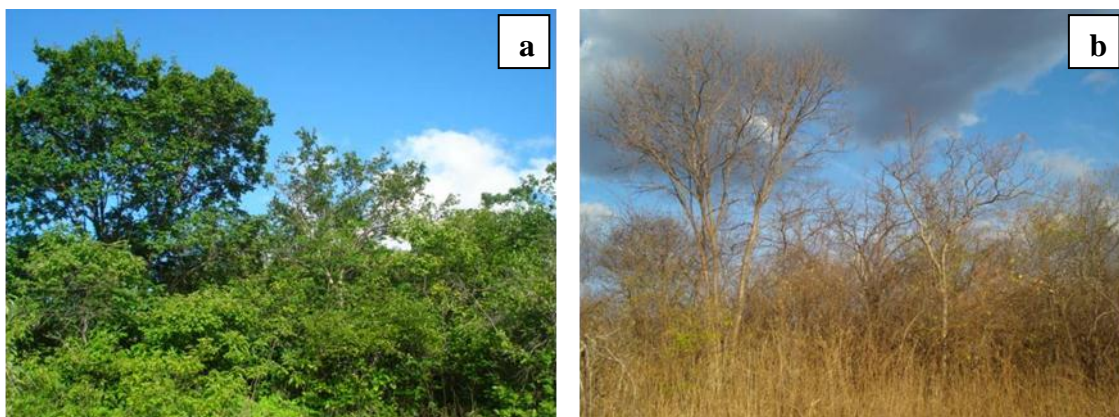


Figura 6 – Microbacia experimental B1, cobertura composta de Caatinga Nativa (CN), estação chuvosa (a) e estação seca (b).

Já no primeiro ano de estudo (2009) na microbacia B2, foi aplicado o raleamento (Figura 7), prática que vem sendo incentivada por pesquisadores para pequenos agricultores do semiárido brasileiro. Este tratamento foi aplicado com o propósito de verificar a influência da prática de raleamento da Caatinga, sobre escoamento superficial, erosão hídrica e produção de sedimentos em pequenas bacias rurais. Foram mantidas na área da B2 as espécies vegetais com diâmetro igual ou maior que 10 cm, e espécies de crescimento herbáceo.

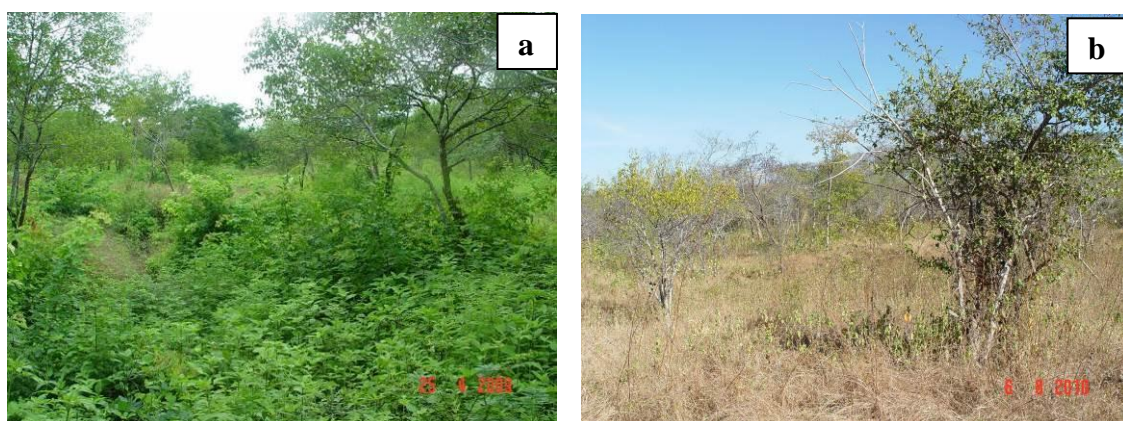


Figura 7 – Microbacia experimental B2, tratamento de raleamento (R), estação chuvosa (a) e estação seca (b).

No final da estação seca (dezembro) do primeiro ano de estudo, 2009, além do manejo de raleamento aplicado na microbacia B2, foi realizado um novo manejo na microbacia B4, que constou de desmatamento total da vegetação seguido de queima e

cultivo de capim (*Andropogon gayanus* Kunt) para pastagem (Figura 8), prática esta de uso do solo extremamente empregada no nordeste brasileiro.

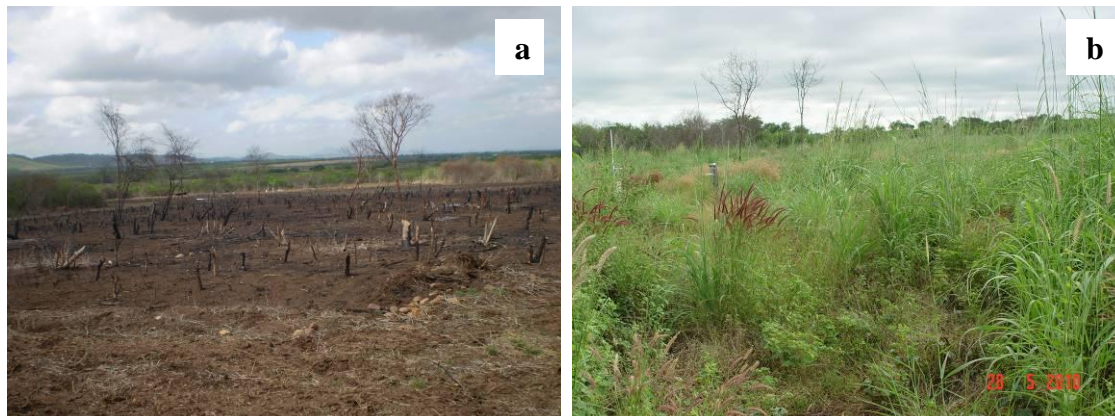


Figura 8 – Microbacia experimental B4, tratamento de desmatamento, queima e cultivo de capim, estação seca (a) e estação chuvosa (b).

Já no final do segundo ano de estudo (dezembro), 2010, foi aplicado um manejo de uso do solo na microbacia B3, que consta de desmatamento da vegetação seguido de enleiramento do material vegetal (troncos, galhos e etc) e cultivo de milho entre leiras (Figura 9). Na Tabela 7, observam-se em síntese as características físicas e de cobertura vegetal das microbasias durante o período estudado.



Figura 9 – Microbacia experimental B3, manejo de desmatamento e enleiramento do material vegetal e cultivo de milho entre leiras, antes (a) e após (b) o cultivo do milho.

Tabela 7 – Características físicas das microbacias e cobertura ao longo do período estudado

Microbacia	Área (ha)	Declividade (%)	Cobertura		
			2009	2010	2011
B1	2,06	10,59	Caatinga Nativa	Caatinga Nativa	Caatinga Nativa
B2	1,15	8,72	Raleamento	Raleamento	Raleamento
B3	1,19	10,63	Caatinga Nativa	Caatinga Nativa	Desmatada/enleiramento/ cultura anual
B4	2,80	5,57	Caatinga Nativa	Desmatada/queima/ pastagem	Pastagem

#### 4.3.2 Escoamento e erosão nas microbacias monitoradas

O escoamento superficial e as perdas de solo foram monitoradas através de quatro estações hidrossedimentológicas, instaladas no exutório de cada microbacia. O escoamento superficial foi quantificado através de quatro calhas Parshall, uma para cada microbacia, sendo essas confeccionadas em fibra de vidro (Figura 10), dimensionadas para um evento com intensidade de 50 mm h<sup>-1</sup> e o solo livre de qualquer cobertura vegetal (ALVES, 2008). A equação das calhas empregadas nesse estudo segue a equação 1, calculada segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2006).

$$Q = 3,72W * 0.0086 W^{0,026} * h^{1,393} W^{0,026} \quad (1)$$

Em que:

Q - vazão da calha Parshall (L s<sup>-1</sup>);

W - largura do estrangulamento da calha (cm), com valor de 47,5 para calhas de B1, B2, e 30 para B3 e B4;

h – altura do nível de água na calha (cm)



Figura 10 – Calha Parshal em fibra de vidro, nas microbacias experimentais, Iguatu-CE.

A altura da água que passa pelas calhas foi mensurada por meio de sensores capacitivos que funcionam com linígrafo (Figura 11). Estes medem a frequência (kHz), sendo necessária a calibração para se obter as alturas de água na calha Parshall. A descrição detalhada de como foi realizada a calibração dos sensores encontra-se no trabalho realizado por Rodrigues (2009). Com a calibração, foram obtidas curvas específicas para cada sensor, que relacionam frequência e altura da água na calha.



Figura 11 – Sensor de nível (linígrafo) usado para medir a altura da água na calha.

As elevações de nível de água ou cotas registradas no linígrafo automático, que foram coletadas continuamente em intervalos de 5 minutos, foram convertidas posteriormente em vazão mediante equação específica de cada calha. Os dados de vazão correlacionados com o tempo proporcionaram a geração de hidrógrafas para cada evento de chuva correspondente.

O volume de água escoado nos canais das microbacias durante um evento de precipitação foi obtido pela seguinte expressão:

$$V = \sum_{t_0}^m Q(t) * \Delta t \quad (2)$$

Em que:

V – volume de água escoado correspondente a cada chuva, L;

$t_0$  – tempo de início do escoamento superficial, s;

$t_n$  - tempo de término do escoamento superficial, s;

$Q(t)$  – vazão em função do tempo,  $L s^{-1}$ , e

$\Delta t$  – intervalo de tempo de escoamento, s.

O volume escoado foi correlacionado com a área da bacia para obtenção da lâmina escoada, de acordo com a expressão:

$$L = \frac{V}{A} * 1000 \quad (3)$$

Em que:

L – lâmina escoada (mm);

V – volume escoado ( $m^3$ ); e

A – área da bacia ( $m^2$ ).

O coeficiente de escoamento superficial (C), que expressa o quanto da precipitação (PPt) converte-se em deflúvio, foi calculado pela razão entre a lâmina escoada e a precipitação, segundo a equação 4.

$$C = \frac{L}{PPt} \quad (4)$$

Em que:

C – coeficiente de escoamento superficial;

L – lâmina escoada (mm);

PPt – precipitação (mm).

Para quantificação da descarga sólida em suspensão em cada microbacia, a montante das calhas Parshall foram instaladas torres coletoras de sedimentos em suspensão (Figura 12). Essas possuem garrafas de 100 mL dispostas equidistantes a 7,5 cm, sendo a primeira a 15 cm do solo. A amostra de água foi coletada através de um tubo (6 mm) conectado às garrafas, sendo o ar liberado pelo sistema respirador (“tubos espaguete” de 3 mm) que possui contato com a atmosfera no topo da torre. As coletas das amostras foram realizadas sempre após os eventos geradores de escoamento superficial suficiente para que a água atingisse a altura da(s) abertura(s), e em seguida encaminhadas ao laboratório para quantificação da concentração de sólidos totais.

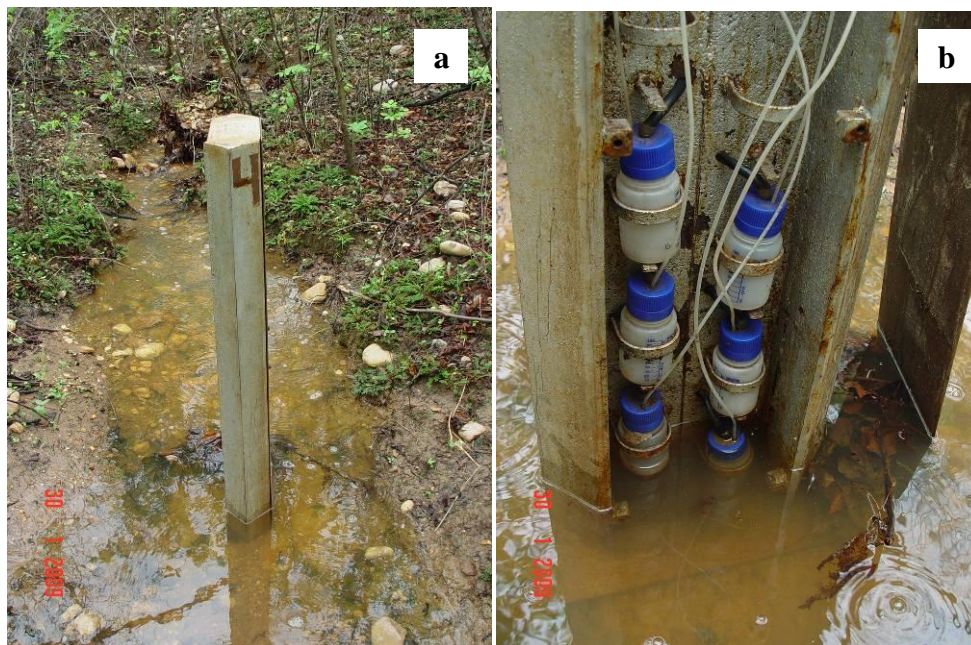


Figura 12 – Torre coletora de sedimento (a) e detalhe das garrafas coletoras de água e sedimentos provenientes de escoamento superficial (b).

Após a experiência do primeiro ano de estudo, 2009, observou-se a necessidade de quantificar a fração da perda de solo por arraste de leito nas microbacias. Dessa forma, no segundo ano de estudo, 2010, foram instalados fossos a montante de cada calha (Figura 13), com capacidade total de 185 L, no intuito de retenção de todo o volume de solo em arraste. Após o evento gerador de escoamento, era realizada a homogeneização da água com sedimentos no fosso e coletada uma amostra para quantificação do total de sólidos.



Figura 13 – Fosso coletor de sedimentos em arraste de leito (a) e em detalhe o processo de coleta de amostras de água e sedimentos (b).

### 4.3.3 Parcelas de erosão de 20 m<sup>2</sup>

Os valores de escoamento superficial e de erosão foram quantificados em seis parcelas experimentais de perdas de solo e água com área igual a 20 m<sup>2</sup> (2 x 10 m), com o comprimento maior obedecendo o sentido da declividade do terreno. As parcelas foram distribuídas nas microbacias mencionadas (B1, B2, B3 e B4), sendo a cobertura do solo representativa de cada microbacia de forma a representar as condições dos manejos estudados em escala espacial de 20 m<sup>2</sup> (Tabela 8). As parcelas de solo nu foram instaladas nas microbacias B3 e B4 de modo a representar as perdas nos dois tipos de solo da área, quando desprotegido (sem cobertura vegetal), que são Luvisolo crômico carbonático típico (microbacia B3) e Vertissolo Ebânico Carbonático Típico (microbacias B1, B2 e B4).

Tabela 8 – Características físicas das parcelas, localização nas microbacias e cobertura ao longo do período estudado

Parcela (20 m <sup>2</sup> )	Microbacia	Declividade (%)	Cobertura		
			2009	2010	2011
P20_CN	B1	7,7	Caatinga Nativa	Caatinga Nativa	Caatinga Nativa
P20_R	B2	13,5	Raleamento	Raleamento	Raleamento
P20_EC	B3	7,6	Caatinga Nativa	Caatinga Nativa	Desmatada/enleiramento /cultura anual
P20_LNU	B3	7,3	-	-	Luvisolo/solo nu
P20_QP	B4	8,8	Caatinga Nativa	Desmatada/queima /pastagem	Desmatada/queima /pastagem
P20_VNU	B4	8,4	-	-	Vertissolo/solo nu

CN – Caatinga Nativa; R – Raleamento; EC – Desmatada/enleiramento/cultura anual; LNU – Luvisolo/solo nu; QP – Desmatada/queima /pastagem; VNU – Vertissolo/solo nu.

As parcelas foram delimitadas com chapa de aço galvanizado com 0,30 m de altura, sendo enterrada 0,15 m no solo (Figura 14a). A face da parcela localizada na parte mais baixa foi conectada a um sistema coletor, constituído de três tanques com capacidade de 30, 100 e 200 L, respectivamente. O primeiro tanque (Figura 14b) é composto com um sistema de sete janelas. Após o enchimento do primeiro tanque, 1/7 do escoamento superficial da parcela é canalizado para o segundo tanque, que uma vez



cheio, o excedente é conduzido para o terceiro tanque (Figura 14c). Com o somatório do volume armazenado no primeiro tanque mais sete vezes o volume armazenado no segundo e terceiro tanques, pode-se calcular a lâmina escoada por evento e o coeficiente de escoamento superficial.



Figura 14 – Parcela experimental de erosão de 20 m<sup>2</sup> (a); primeiro tanque coletor (b), segundo e terceiro tanques coletores (c), Iguatu-CE

As amostras de água e sedimentos foram extraídas do primeiro tanque coletor, após o evento de chuva gerador do escoamento. As amostras eram previamente homogeneizadas, e realizada uma coleta utilizando garrafas plásticas de 500 mL de capacidade, devidamente identificadas.

#### 4.3.4 Parcelas de erosão de 1 m<sup>2</sup>

Para comparação das respostas de perdas de solo e água em uma microescala, foram instaladas seis parcelas de erosão de 1 m<sup>2</sup>, no ano de 2011. As parcelas foram distribuídas nas microbacias, de forma a representar os distintos manejos estudados. Dentre as parcelas, duas foram mantidas com solo nu, da mesma forma da parcela de 20 m<sup>2</sup>, com intuito de representar as perdas de solo e água em uma área sem cobertura vegetal na microescala, nos dois tipos de solo estudados. Na Tabela 9 encontra-se o resumo das condições de cobertura vegetal e localização das parcelas de 1 m<sup>2</sup> dentro das microbacias estudadas.

Tabela 9 – Características físicas das parcelas de 1 m<sup>2</sup>, localização nas microbacias e cobertura vegetal

Parcela (1 m <sup>2</sup> )	Microbacia	Cobertura vegetal e estado da superfície
P1_CN	B1	Caatinga Nativa
P1_R	B2	Raleamento
P1_EC	B3	Desmatada/Enleiramento/Cultura anual
P1_LNU	B3	Luvissolo/solo nu
P1_QP	B4	Desmatada/queima/pastagem
P1_VNU	B4	Vertissolo /solo nu

CN – Caatinga Nativa; R – Raleamento; EC – Desmatada/enleiramento/cultura anual; LNU – Luvissolo/solo nu; QP – Desmatada/queima /pastagem; VNU – Vertissolo/solo nu.

As parcelas foram delimitadas com chapa de aço galvanizada com 0,30 m de largura, que foi enterrada no solo até a profundidade de 0,15 m (Figura 15a). Na parte inferior da parcela foi conectado um sistema coletor, constituído de um tanque com capacidade de 200 L (Figura 15b), ao qual é acoplado um balde com capacidade de 18 L que, uma vez cheio, extravasa para o tanque.



Figura 15 – Parcela de erosão de 1 m<sup>2</sup> (a) e sistema coletor de água e sedimento (b), Iguatu-CE.

#### 4.4 Controle das condições físicas nas microbacias e parcelas

Para uma avaliação comparativa dos processos medidos ao longo dos anos estudados, foi necessário manter as condições físicas das parcelas e microbacias uniformes durante o início do período chuvoso, quando os dados estavam sendo coletados. Este controle foi exercido rigorosamente nas parcelas e microbacias onde a vegetação não era Caatinga, ou seja, na microbacia raleada, desmatada com pastagem (capim) e nas parcelas com solo nu. Nas parcelas desmatadas (solo nu), a vegetação superficial era removida frequentemente. Na microbacia raleada e com pastagem, a vegetação foi roçada no início do período chuvoso e deixados os restos vegetais na área.

#### 4.5 Análises de Sólidos Totais

As amostras de água coletadas após eventos geradores de escoamento superficial eram conduzidas ao Laboratório de Água, Solos e Tecido Vegetal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)-Campus Iguatu e acondicionadas em geladeira a 4 °C até a determinação dos parâmetros físico-químicos.

As análises de sólidos totais foram realizadas conforme metodologia descrita por APHA (1998) (Figura 16).

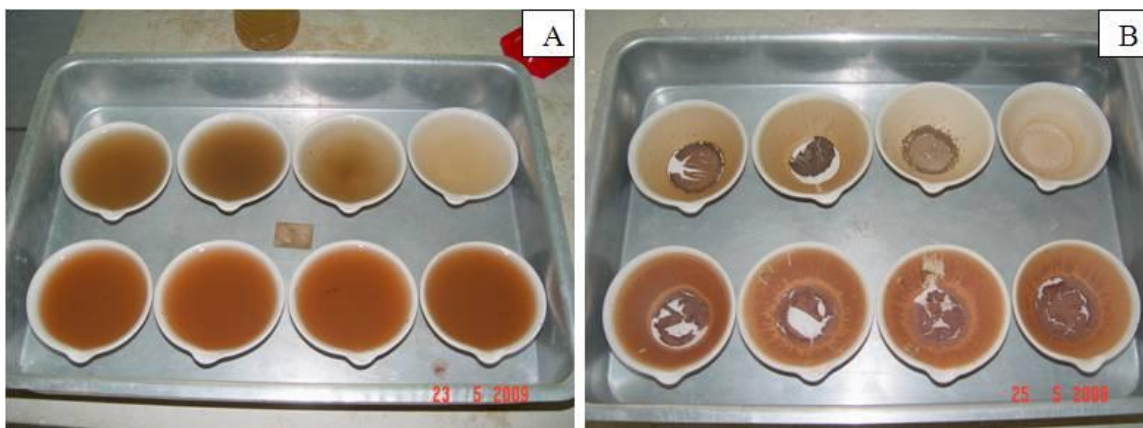


Figura 16 – Determinação das concentrações de sólidos totais na água de escoamento: Cápsulas com amostra de água antes da evaporação (A) e cápsulas após a evaporação (B).

#### 4.6 Descarga Específica de Sedimento (DES)

A Descarga Específica de Sedimento (DES) para cada evento foi calculada conforme a equação 5. Em seguida foi gerado gráfico de boxplot, através do software SPSS v.16.0.

$$DES = \frac{PS}{L} \quad (5)$$

Onde:

DES Descarga Específica de Sedimento ( $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ );

PS perda de solo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); e

L lâmina escoada (mm).

#### 4.7 Precipitação

Os dados pluviométricos foram obtidos em três estações pluviográficas automáticas, instaladas na área de estudo, com aquisição de dados a cada 5 minutos (Figura 17a). As quatro microbacias foram equipadas também com três pluviômetros *Ville de Paris*, servindo como referência aos dados dos pluviógrafos de báscula, sendo um deles situado na B3, outro na B4, e um terceiro representativo das bacias B1 e B2 (Figura 17b). Os dados nos pluviômetros foram coletados durante o acumulado de 24 h.

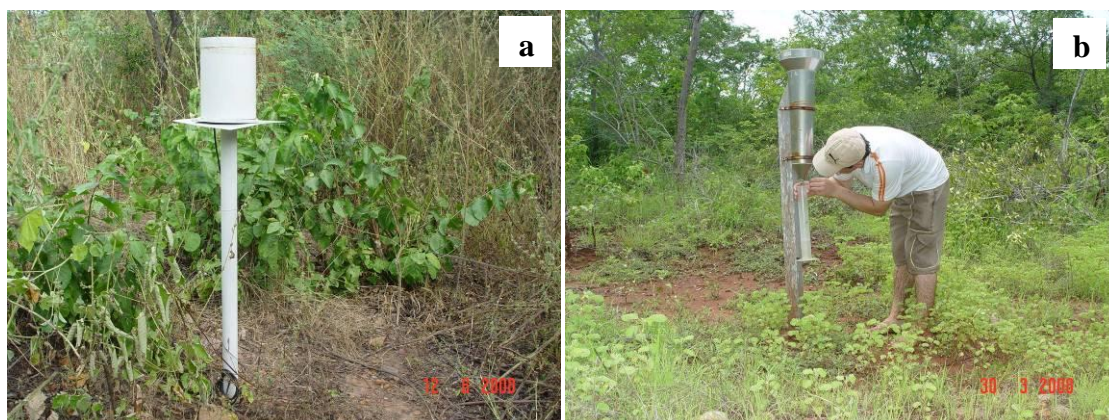


Figura 17 – Pluviógrafo do tipo Báscula (a) e pluviômetro *Ville de Paris* (b) instalados na área de estudo, Iguatu-CE

#### 4.8 Erosividade ( $EI_{30}$ ) da chuva

De posse dos dados de precipitação, foram calculadas as intensidades ( $I$ ) de cada evento, em  $\text{mm h}^{-1}$ , além da máxima intensidade em trinta minutos,  $I_{30}$  em  $\text{mm h}^{-1}$ . A energia cinética ( $EC$ ) associada à chuva, em  $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ , foi obtida pela equação proposta por Wischmeier e Smith (1978) modificada por Foster *et al.* (1981):

$$EC = 0,119 + 0,0873 \text{Log } I \quad (6)$$

Em que:

$EC$  - energia cinética da chuva, em  $\text{MJ ha}^{-1}$ ,

$I$  - intensidade da chuva, em  $\text{mm h}^{-1}$ .

Os valores obtidos através da equação (6) foram utilizados para o cálculo do índice de erosividade  $EI_{30}$ , a partir da equação abaixo:

$$EI_{30} = EC \times I_{30 \text{ máx}} \quad (7)$$

Em que:

$EI_{30}$  - índice de erosividade, em  $MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ,

$I_{30 \text{ máx}}$  - intensidade máxima média da chuva em 30 minutos, em  $\text{mm h}^{-1}$ .

#### 4.9 Umidade do solo

A umidade antecedente do solo a um determinado evento pluviométrico é uma das principais variáveis que influenciam na ocorrência do escoamento superficial, sendo de extrema importância o seu conhecimento (FIGUEIREDO, 2011). Uma maior ou menor umidade do solo pode ser determinante na ocorrência ou não do escoamento. Com o objetivo de analisar a influência da umidade antecedente do solo no escoamento, no ano hidrológico de 2009 foram realizadas coletas de amostras periodicamente, e nos anos de 2010 e 2011 as amostragens foram realizadas diariamente (com três repetições) nas quatro microbacias, e para sua determinação foi utilizado o método gravimétrico. As amostras eram acondicionadas em latas de alumínio e estas isoladas com fita adesiva.

As amostras de solo foram encaminhadas ao Laboratório de Água, Solos e Tecidos Vegetais – LABAS do IFCE - Campus Iguatu, onde eram previamente pesadas para obtenção da massa de solo úmido e levadas à estufa com temperatura de  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , por um período de 24 horas. Passado esse período, o solo era novamente pesado para obtenção da massa do solo seco. De posse dos dados de massa solo úmido e seco, a umidade foi determinada por meio da equação 8.do

$$u = \left( \frac{m_u - m_s}{m_s} \right) 100 \quad (8)$$

Em que:

$u$  – umidade do solo com base em massa (%)

$m_u$  – massa do solo úmido (g)

$m_s$  – massa do solo seco (g)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Características das chuvas

Para os anos hidrológicos estudados, 2009, 2010 e 2011 foram encontrados índices de erosividade ( $EI_{30}$ ) de 5.716, 5.418 e 12.717  $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$  para lâminas totais precipitadas de 1.063, 800, 1.374 mm, respectivamente (Tabela 10). O total precipitado em 2009 foi 22% superior à média, sendo 2010 com 8% inferior e 2011 com cerca de 60% superior à média da região. Embora, no ano de 2010 a precipitação total anual tenha sido 25% menor que 2009, o  $EI_{30}$  foi apenas 5% menor. O ano de 2011, além de apresentar a maior pluviometria (1.374 mm), também apresentou o maior poder erosivo, sendo 123% e 134% maior que 2009 e 2010, respectivamente.

Tabela 10 – Valores mensais de precipitação e erosividade para as microbacias experimentais de Iguatu, período chuvoso de 2009, 2010 e 2011

Mês	Precipitação (mm)			$EI_{30}$ ( $MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$ )		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Janeiro	193	135	273	182	671	2.326
Fevereiro	218	144	275	1.837	1.490	2.238
Março	134	190	82	471	1.374	653
Abril	399	239	477	2.724	1.687	5.113
Mai	118	52	267	503	135	2.388
Junho	0	41	0	0	62	0
Total	1.063	800	1.374	5.716	5.418	12.717
Média	177	133	229	953	903	2.120
Desvio-padrão	132	77	168	1.082	712	1.774
CV (%)	75	58	73	114	79	84

Os elevados índices de erosividades resultam em grande quantidade de energia para desagregação das partículas do solo. Esse fato pode ser mais preocupante no mês de janeiro para a região, mês no qual o solo encontra-se desprotegido, uma vez que as espécies vegetais da Caatinga perdem suas folhas por conta do período de

estiagem (Figura 18). Para o mês de janeiro de 2010, o  $EI_{30}$  foi 3,7 vezes maior que no referido mês em 2009, mesmo com uma precipitação 30% menor, tal fato expressa a importância de se conhecer a intensidade dos eventos. Já para o mês de janeiro de 2011, o  $EI_{30}$  foi 12,8 e 3,5 vezes maior que no referido mês nos anos 2009 e 2010, respectivamente, caracterizando o alto poder erosivo do referido ano.



Figura 18 – Vegetação de Caatinga Nativa na estação seca, na microbacia experimental de Iguatu-CE.

Avaliando a variação mensal do total precipitado e dos índices de erosividade (Tabela 10), observam-se elevados coeficientes de variação, que é característico do regime pluviométrico da região semiárida do nordeste brasileiro, onde as chuvas se caracterizam por uma curta duração e alta intensidade e erosividade. O mês de abril apresentou a maior concentração das precipitações e erosividade para os três anos estudados, com destaque para o ano de 2011, com 35% das chuvas e 40% da erosividade total concentradas no referido mês.

A chuva é o mais importante parâmetro físico que afeta a erosão do solo em regiões tropicais (THOMAZ, 2009). Portanto, as suas características são essenciais no entendimento do escoamento e das perdas de solo. Durante o período de monitoramento, 116 eventos naturais de precipitação foram registrados. Na Figura 19 observa-se a distribuição dos eventos pluviométricos com as suas respectivas



características de erosividade ( $EI_{30}$ ) e intensidade máxima em 30 minutos ( $I_{30 \text{ máx}}$ ) para os anos hidrológico estudados, 2009, 2010 e 2011, os quais se caracterizam pela alta variabilidade dos eventos. Em 2011 e 2010 ocorreram 8 e 7 eventos extremos, respectivamente (Figura 19), com precipitação superior a 50 mm e alta erosividade, contra apenas três para 2009.

Embora os eventos pluviométricos menores que 30 mm tenham ocorrido em maior frequência (71%) do total registrado, os mesmos foram responsáveis por uma precipitação total acumulada de apenas 41%. Em contraste, eventos maiores que 40 mm foram menos frequente, constituindo 21% dos eventos (24 eventos) e sendo responsáveis por 47% do total precipitado para os três anos estudados. Quanto à erosividade, para o período de estudo ocorreram 16 eventos de erosividade maior que  $500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ , apesar de corresponderem a apenas 14% dos eventos, a soma da erosividade dos mesmos equivale a 54% do total no período. Boix-Fayos *et al.* (2005), quantificando a perda de solo em diferentes escalas em áreas do Mediterrâneo, afirmam que os eventos pluviométricos extremos são responsáveis pela maior parte da erosão do solo.

O conhecimento da intensidade da chuva é de fundamental importância, uma vez que esses valores podem determinar ou não o início do escoamento. Quanto à intensidade máxima da chuva em trinta minutos ( $I_{30 \text{ máx}}$ ) observa-se 6; 5 e 14 eventos superiores a  $40 \text{ mm h}^{-1}$ , para os anos de 2009, 2010 e 2011, respectivamente (Figura 19), sendo todos esses eventos geradores de escoamento. Eventos com intensidade superior a capacidade de infiltração do solo no momento da ocorrência do mesmo (dependente da umidade do solo) ocasionará escoamento. Em escala de parcela, importantes limiares para os parâmetros relacionados à chuva foram identificados para regiões semiáridas da Espanha, por diferentes pesquisadores. Por exemplo, em condições de parcela, os limiares para a ocorrência de chuvas erosivas foram estabelecidas em 10 a  $15 \text{ mm h}^{-1}$  em 30 min em Murcia (MARTÍNEZ-MENA *et al.*, 2001) e  $4,2 \text{ mm h}^{-1}$  no intervalo de 10 min para a mesma região (CAMMERAAT, 2002). Já para a região de Tabernas (Almeria) o limiar foi definido como  $5,6 \text{ mm h}^{-1}$  a 5 min de intervalo (CANTÓN *et al.*, 2001).

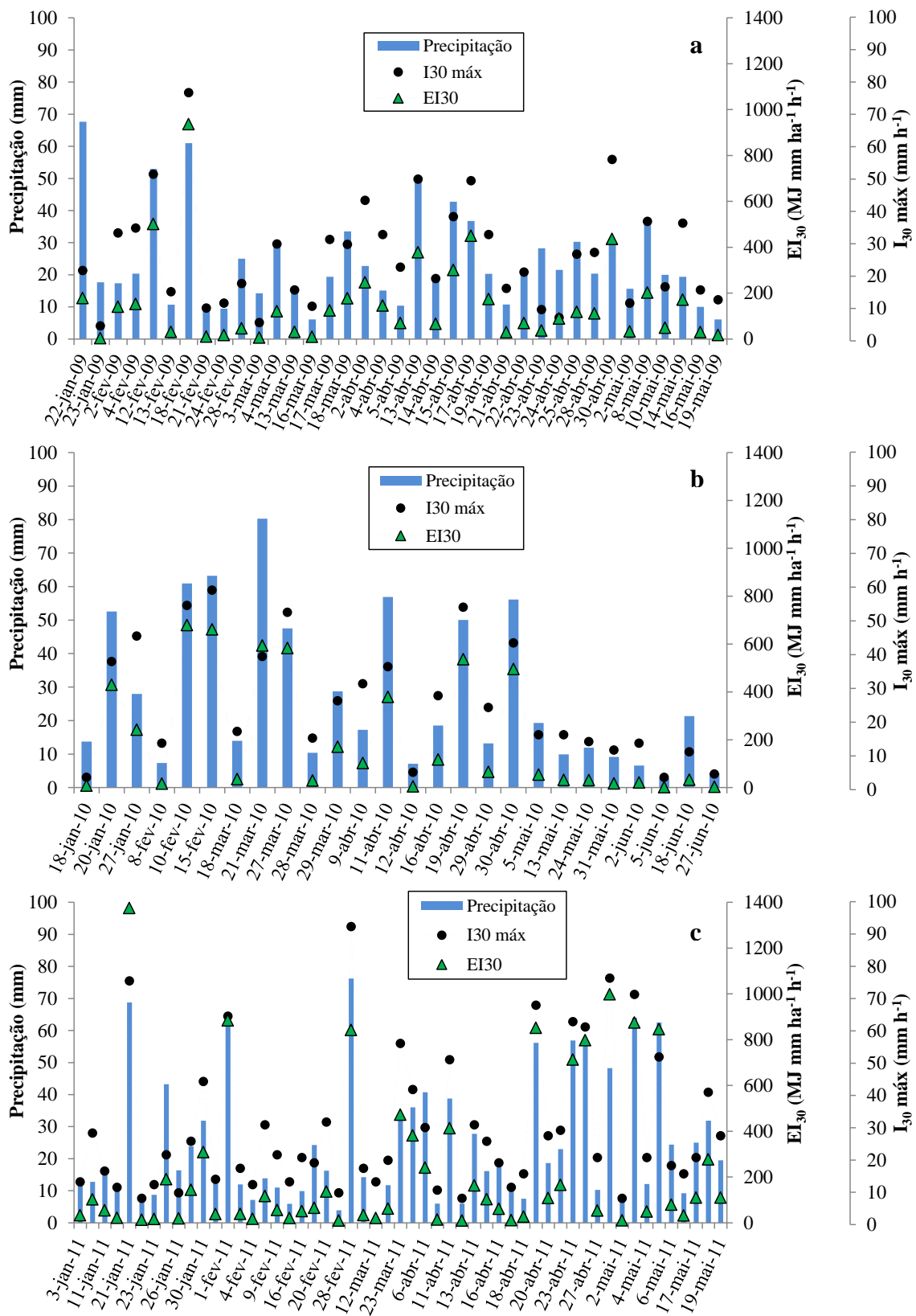


Figura 19— Precipitação (PPT), intensidade máxima em trinta minutos ( $I_{30}$ ) e índice de erosividade ( $EI_{30}$ ) para o ano de 2009 (a), 2010 (b) e 2011 (c) nas microbacias experimentais de Iguatu-CE.

## 5.2 Escoamento superficial

### 5.2.1 Área B1 (Caatinga nativa)

Os maiores coeficientes de escoamento foram registrados na escala de parcela de 20 m<sup>2</sup>, com exceção do ano de 2009, com valores de 3,3; 3 e 33% para os anos de 2009, 2010 e 2011, respectivamente (Figura 20). O coeficiente de escoamento em 2011 para as escalas de microbacia e parcela de 1 m<sup>2</sup>, foi cerca de 59 e 75% menor em relação às medidas na escala de 20 m<sup>2</sup>, com valores de coeficiente de 14% e 8%, respectivamente. Na microescala (parcela de 1 m<sup>2</sup>) o escoamento é reduzido pela menor acumulação e velocidade de fluxo (CHAPLOT; LE BISSONNAIS, 2000). Já na escala de microbacia, com o aumento do comprimento das vertentes e a presença de pontos de elevada capacidade de infiltração, aumenta a possibilidade de infiltração do escoamento gerado a montante.

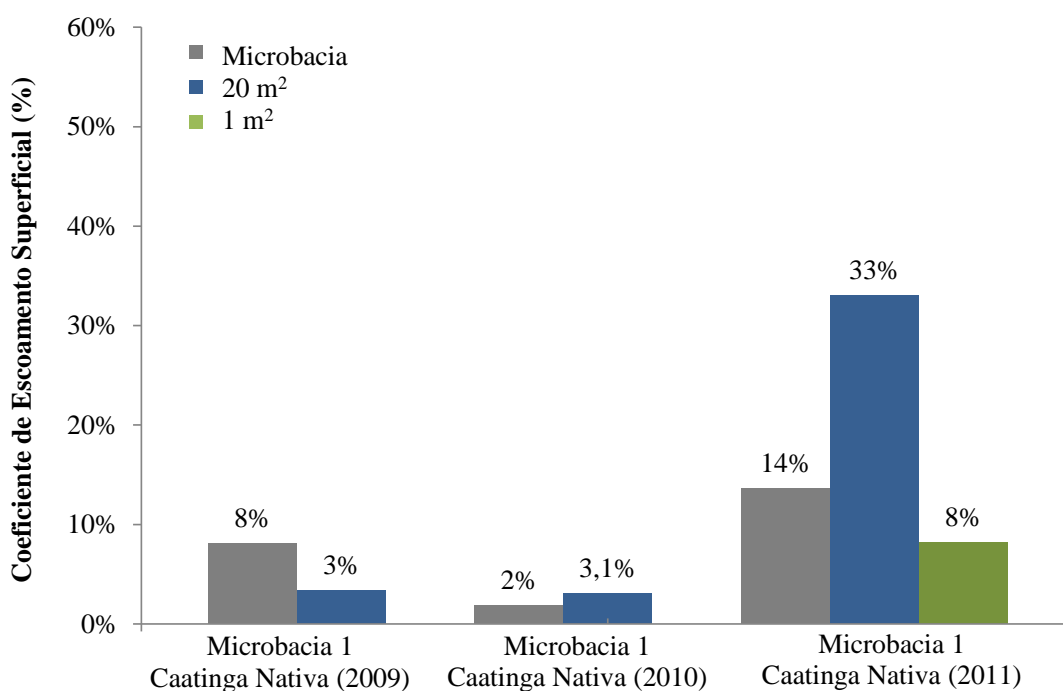


Figura 20 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE.

### 5.2.2 Área B2 (raleamento da Caatinga)

Semelhante ao comportamento observado para a área B1, na área B2 onde foi aplicado o manejo de raleamento da Caatinga, observou-se maiores coeficientes de escoamento para a escala de parcela de 20 m<sup>2</sup> com valores de 38; 10 e 54%, nos anos de 2009, 2010 e 2011, respectivamente (Figura 21). Para os anos de 2009 e 2010 os coeficientes de escoamento na escala de 20 m<sup>2</sup> foram 522 e 634% maiores em relação à escala de microbacia, respectivamente. Dessa forma, na escala de 20 m<sup>2</sup>, o escoamento só para o ano de 2011 foi 418 e 6.208% vezes maior em relação às escalas de microbacia e parcela de 1 m<sup>2</sup>, as quais apresentaram coeficiente de escoamento de 10 e 1%, respectivamente. Um fator que pode ter contribuído para a elevação do coeficiente de escoamento na parcela de 20 m<sup>2</sup> é o fato de a parcela apresentar a maior declividade com valor de 13,5% (Tabela 8). O menor coeficiente de escoamento na parcela de 1 m<sup>2</sup> com valor de 1% (Figura 21), reforça a importância do fator declividade na elevação do coeficiente de escoamento.

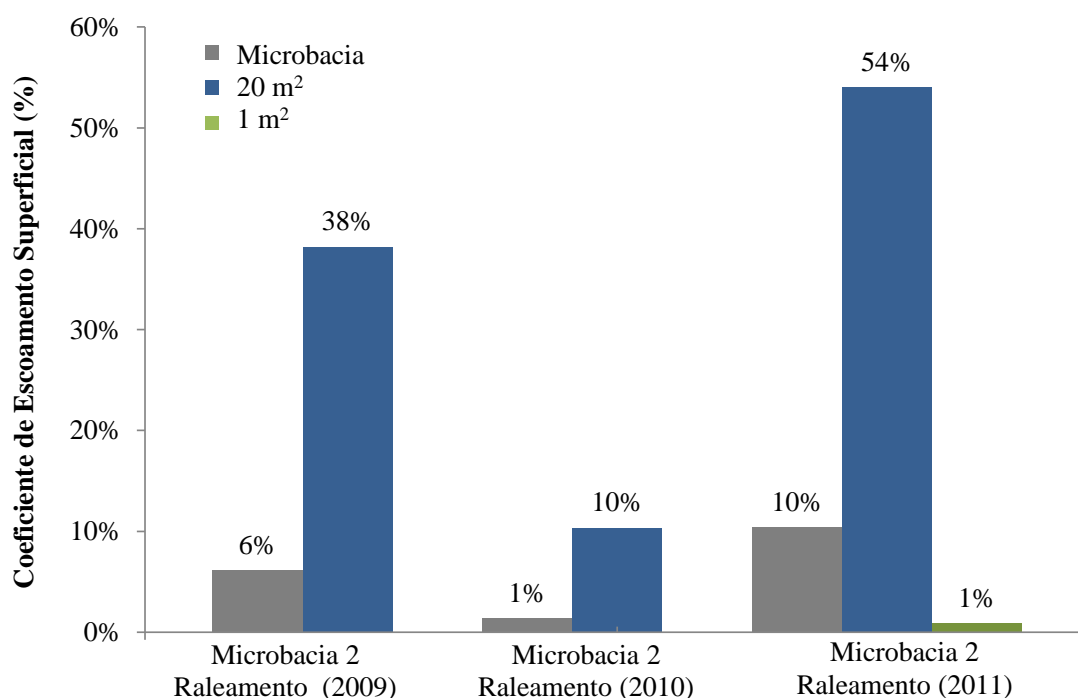


Figura 21 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE.

A área B2, embora tenha recebido o tratamento de raleamento, apresentou na escala de microbacia menor coeficiente de escoamento superficial em relação à área B1 (Caatinga nativa), com redução de 32; 34 e 31% para 2009, 2010 e 2011, respectivamente. Esses resultados justificam-se pelo grande desenvolvimento da cobertura vegetal herbácea, que cobriu praticamente toda a superfície do solo. Dessa forma, o extrato herbáceo mais desenvolvido na área B2 (Figura 22), atenua o escoamento, com a redução do impacto direto das gotas da chuva no solo e maior resistência ao fluxo de água (THOMAZ, 2009).

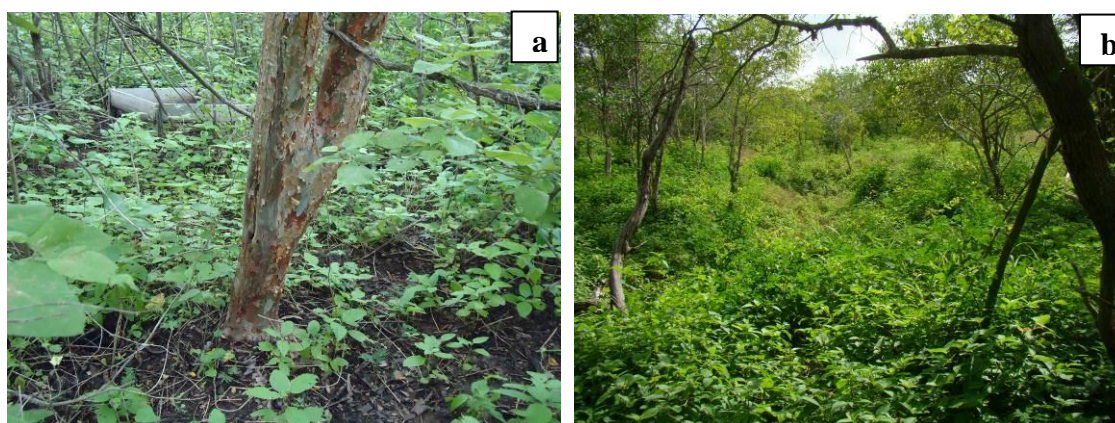


Figura 22 – Extrato herbáceo na microbacia B1/Caatinga nativa (a), e microbacia B2 com manejo de Raleamento da Caatinga (b), no período chuvoso na estação experimental de Iguatu-CE.

### 5.2.3 Área B3 (desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho)

De acordo com a Figura 23, o coeficiente de escoamento superficial anual nas diferentes escalas espaciais para a área B3, com manejo inicial de Caatinga (2009 e 2010) seguido do manejo de uso do solo de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho (EC) (2011), apresentaram nos três anos, maiores coeficientes para a escala de 20 m<sup>2</sup>. Para o período com vegetação de Caatinga, o coeficiente de escoamento na escala de parcela de 20 m<sup>2</sup> foi maior em relação à microbacia em cerca de 54% para o ano de 2009 e 812% para 2010. Para o período com

o manejo EC (2011), o coeficiente de escoamento nas escalas de 20 m<sup>2</sup> foi cerca de 180% maior que nas escalas de microbacia e 1 m<sup>2</sup>.

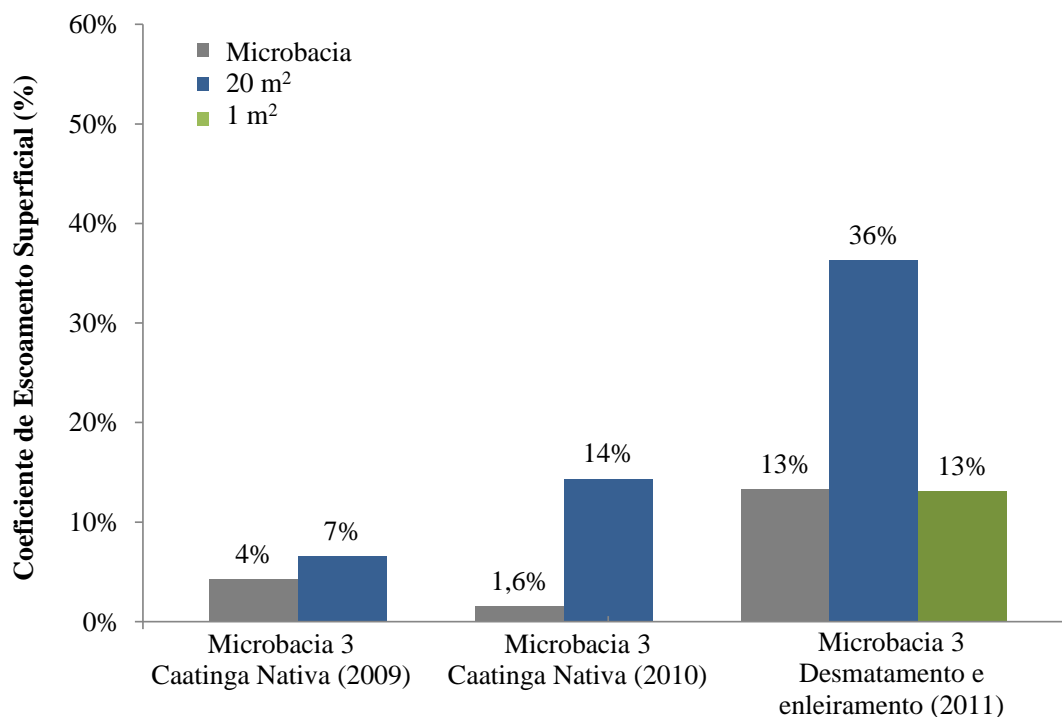


Figura 23 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE.

Após o manejo de uso do solo de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho (EC) em 2011 e com regime pluviométrico superior aos demais anos estudados, observa-se incremento substancial no coeficiente de escoamento superficial em relação ao período anterior com cobertura de Caatinga nativa (Figura 23). Para a escala de parcela de 20 m<sup>2</sup> o incremento foi de 453% e 153% em relação aos anos de 2009 e 2010, respectivamente. Na escala de microbacia, o incremento foi de 211% e 746% em relação aos anos de 2009 e 2010, respectivamente. Porém, no ano de 2011 ocorreu maior coeficiente de escoamento superficial também para a microbacia com vegetação natural (B1-caatinga nativa), uma vez que no referido ano ocorreu a maior altura pluviométrica sendo 60% maior que a média anual. Dessa forma necessita a continuação do monitoramento nos anos seguintes para uma melhor conclusão da sustentabilidade ou não desse manejo, uma vez que o aumento das perdas de água, solo e nutrientes leva à queda de fertilidade do solo, podendo iniciar o processo de

desertificação. Santos *et al.*, (2007) ressaltam o importante papel que a cobertura vegetal pode desempenhar no controle das perdas de água por escoamento superficial, principalmente, quando considerada a irregularidade temporal e espacial das chuvas na região semiárida do Nordeste do Brasil.

#### 5.2.4 Área B4 (desmatamento/queimada/cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt)

Para a área B4, com exceção do período com cobertura de Caatinga nativa (2009), os maiores coeficientes de escoamento foram observados na escala de 20 m<sup>2</sup> (Figura 24). Entretanto, o coeficiente de escoamento na escala de 20 m<sup>2</sup> no período com cobertura de Caatinga nativa foi apenas 7% menor em relação à escala de microbacia. Já para o primeiro e segundo ano (2010 e 2011) após o tratamento de desmatamento, queima e cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt, o coeficiente de escoamento foi 45% e 54%, respectivamente, maior na escala de 20 m<sup>2</sup> em relação à escala de microbacia. Para o segundo ano após o manejo, o coeficiente de escoamento na escala de 1 m<sup>2</sup> foi 14% maior do que na escala de microbacia.

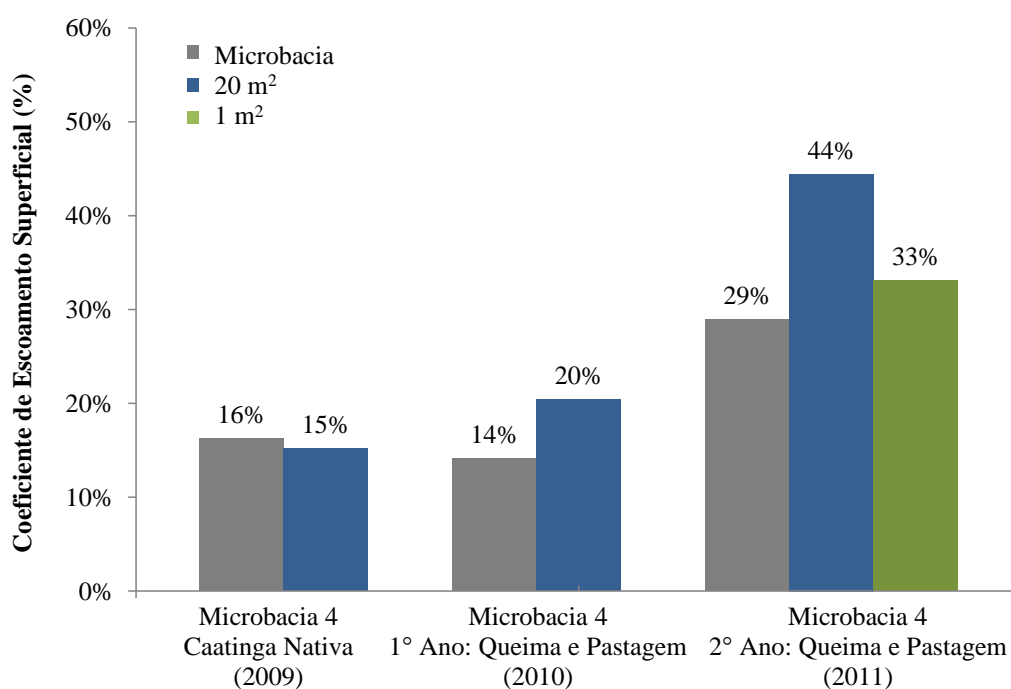


Figura 24 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento, queima e cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt no primeiro e segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE.

Apesar do desenvolvimento da cobertura vegetal (*Andropogon gayanus* Kunt), no segundo ano após o tratamento na área B4, houve incremento no valor do coeficiente de escoamento, em 105 e 117% para as escalas de microbacia e 20 m<sup>2</sup>, respectivamente, em relação ao primeiro ano após o tratamento. Esse resultado deve-se à maior concentração das chuvas para o segundo ano (2011) após o tratamento em relação a 2010, com chuvas de maior altura pluviométrica, maior intensidade, elevadas erosividades e com menor espaço de tempo entre eventos (que resultaram em aumento da umidade antecedente do solo), conforme foi analisado na seção anterior (5.1 Características das chuvas). Tal fato confirma a importância do regime pluviométrico no processo de geração de escoamento.

No primeiro ano de estudo após o tratamento (2010), na escala de 20 m<sup>2</sup> observa-se maior coeficiente de escoamento em relação ao ano anterior com vegetação de Caatinga nativa, com incremento de cerca de 35% (Figura 24). Esse comportamento é atribuído aos efeitos do tratamento, que ocasionou uma maior exposição do solo e a redução das barreiras físicas (árvores, galhos secos, serapilheira e etc.) que retardam o escoamento. Outro fato que reforça o efeito do manejo do solo no incremento do escoamento foi que para as áreas B1-CN e B2-R houve redução do coeficiente de escoamento em 2010 em relação a 2009. Resultados semelhantes foram encontrados por Thomaz (2009), onde um perceptível aumento no coeficiente de escoamento foi observado imediatamente após o manejo de fogo, seguido por uma contínua diminuição do coeficiente nos anos seguintes.

### **5.2.5 Parcelas com solo nu**

Na Figura 25 observa-se os valores do coeficiente de escoamento superficial anual para as condições de solo nu nas escalas de 20 m<sup>2</sup> e 1 m<sup>2</sup>, na microbacia B3 representativa do Luvisolo Crômico Carbonático Típico, e na microbacia B4 representativa do Vertissolo Ebânico Carbonático Típico (solo das microbacias B1, B2 e B4). Semelhantes aos demais tratamentos, as parcelas de 20 m<sup>2</sup> apresentaram maiores



escoamentos em relação às parcelas de 1 m<sup>2</sup>, sendo 103 e 28% maior para as parcelas com Luvissole e Vertissolo, respectivamente.

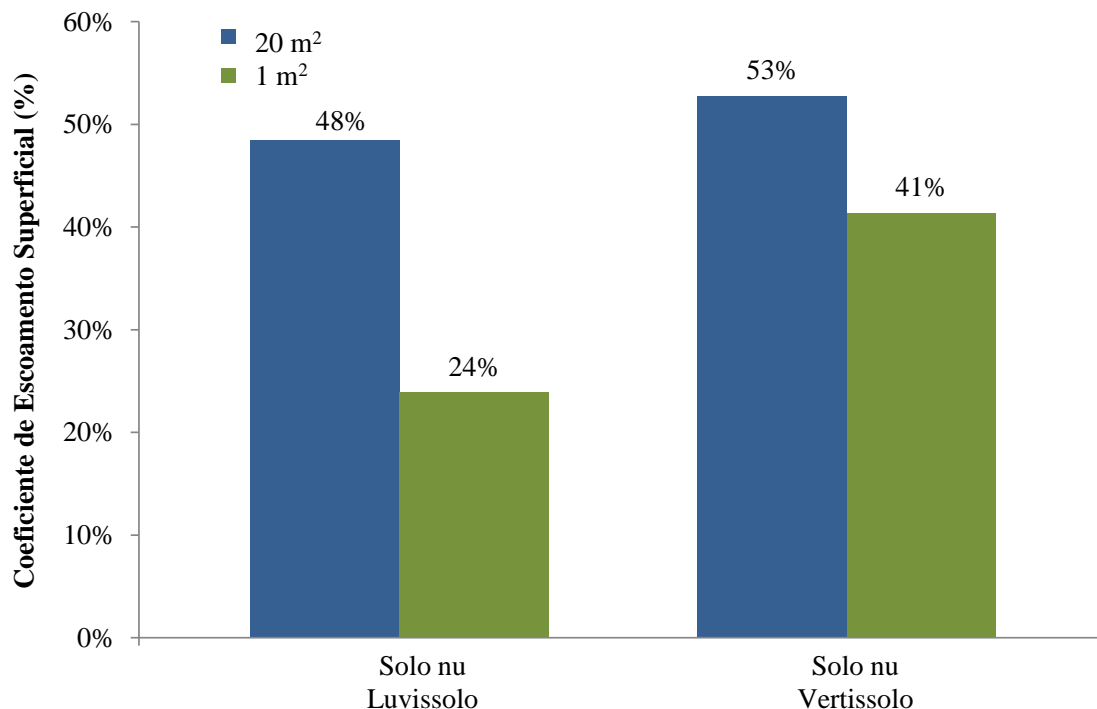


Figura 25 – Coeficientes de escoamento superficial anual em diferentes escalas espaciais, para as parcelas de erosão com solo nu em área com Luvissole e Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

As parcelas de solo nu foram inseridas na área de estudo com objetivo de medir o potencial máximo de escoamento e perda de solo para a área estudada. Dessa forma, pode-se avaliar o quanto cada manejo pode reduzir as perdas de água e sedimentos por escoamento superficial. Essa comparação foi realizada apenas para o ano de 2011, quando as parcelas de solo nu foram implantadas e todas as técnicas de manejo já haviam sido adotadas. Quanto à redução do coeficiente de escoamento pelos manejos do solo em relação à parcela de solo nu no ano de 2011, as parcelas com cobertura de Caatinga nativa apresentaram os menores coeficientes, seguido do manejo de enleiramento e cultivo de milho (EC), da queima e pastagem e do raleamento. Para a área B3 com o manejo de desmatamento/enleiramento/cultivo de milho, no ano de 2011, os coeficientes de escoamento superficial foram 82% e 33% menores, respectivamente para as escalas de 1 m<sup>2</sup> e 20 m<sup>2</sup>, em relação as parcelas com solo nu. Já para a área B1 com Caatinga nativa os coeficientes de escoamento superficial foram

404% e 60% menores, respectivamente para as escalas de 1 m<sup>2</sup> e 20 m<sup>2</sup>, em relação as parcelas com solo nu.

### **5.3 Efeito da umidade antecedente do solo sobre o início do escoamento superficial para as diferentes escalas espaciais**

Os valores de umidade antecedente do solo com base em massa para as microbacias estudadas, coletados entre as últimas 24 horas antes do início de cada evento, variaram entre 1,8 e 48,3% (Figura 26).

A umidade antecedente do solo mostrou-se como um dos mais importantes fatores na geração do escoamento, uma vez que, eventos pluviométricos maiores que 15 mm e umidade antecedente superior a 30% foram capazes de gerar escoamento em cerca de 90% dos casos, para a escala de 1 m<sup>2</sup> (Figura 26a), e em 96% dos eventos para as escalas de parcela de 20 m<sup>2</sup> e microbacia (Figura 26b e c), independente do manejo. Figueiredo (2011), em estudo na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) numa escala de 7,7 km<sup>2</sup> no semiárido brasileiro, constatou que eventos de precipitação superior a 47,5 mm, independente da umidade antecedente, sempre geraram escoamento.

Para umidade antecedente superior a 20% e eventos pluviométricos maiores que 15 mm, ocorreram escoamento em 73, 82 e 80% dos eventos, para as escalas de 1m<sup>2</sup>, 20 m<sup>2</sup> e microbacia, respectivamente (Figura 26).

Para eventos com umidade antecedente inferior a 15% e chuvas menores que 20 mm, não foram capazes de gerar escoamento em 80, 90 e 100% dos casos, para as escalas de parcela de erosão de 1 m<sup>2</sup> (Figura 26a), parcela de 20 m<sup>2</sup> (Figura 26b) e microbacia (Figura 26c), respectivamente, independente do manejo. Contudo, nos demais intervalos de precipitação e umidade, não foi possível explicar a ocorrência ou não de escoamento, que nesse intervalo deve ser controlado também pelos demais fatores que influenciam a geração do escoamento, como o manejo do solo e estágio de desenvolvimento da cobertura vegetal e as características pluviométricas, sendo estas a intensidade, duração e frequência.

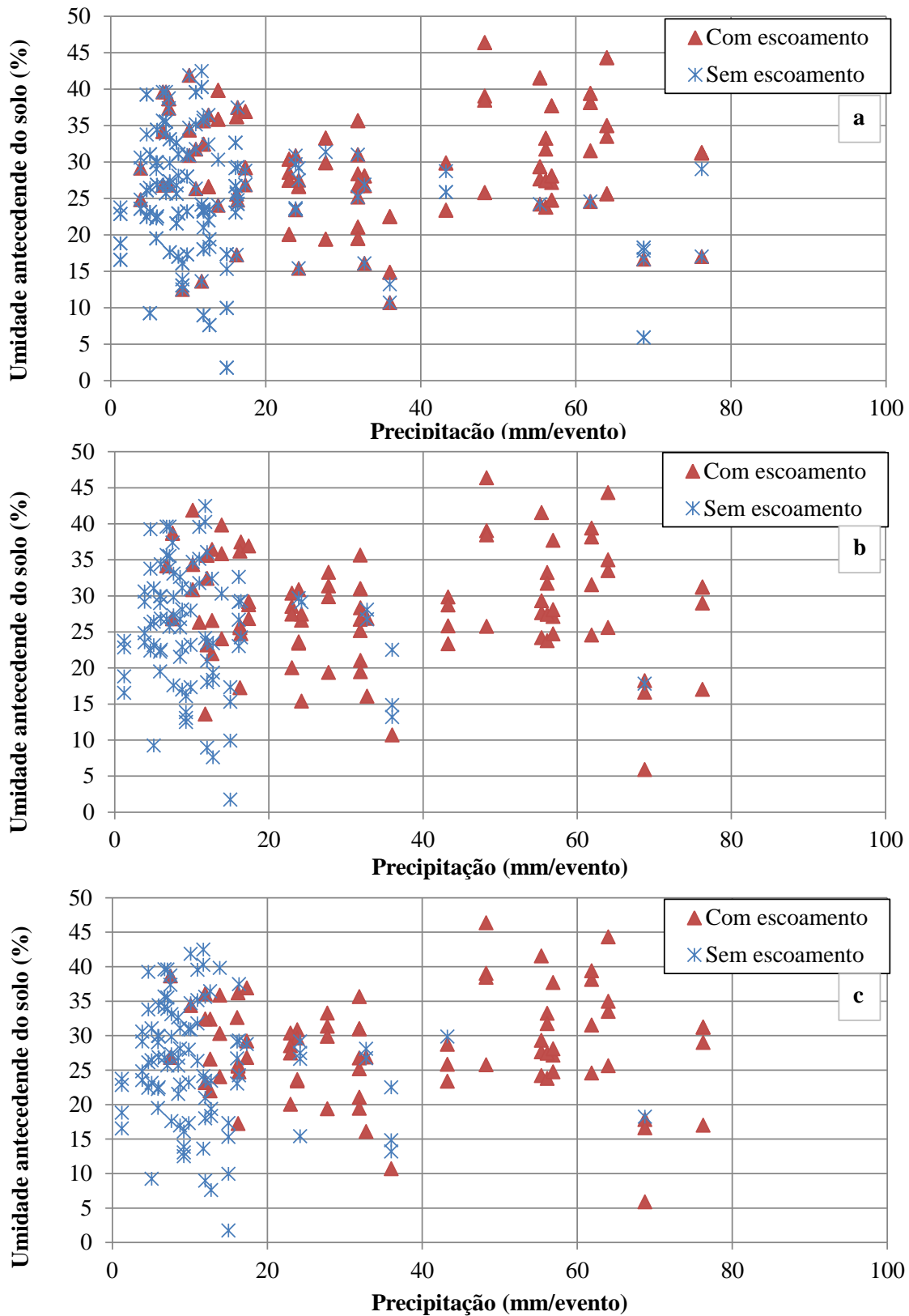


Figura 26 – Relação entre precipitação e umidade antecedente do solo, para a escala de parcela de erosão de 1 m<sup>2</sup> (a), parcela de 20 m<sup>2</sup> (b) e microbacia (c), na estação experimental de Iguatu-CE.

## 5.4 Perdas de solo

### 5.4.1 Área B1 (Caatinga nativa)

As maiores perdas de solo (suspensão e arraste) nos dois primeiros anos estudados na área B1 com Caatinga nativa ocorreram na escala de microbacia em relação à escala de 20 m<sup>2</sup> (Figura 27), sendo superior em 592 e 166%, para 2009 e 2010, respectivamente. Esses resultados ocorrem devido a características particulares da microbacia, a qual apresenta pontos de alta produção de sedimentos (Figura 28abc), sendo esses dificilmente representados na escala de parcela (Figura 28d).

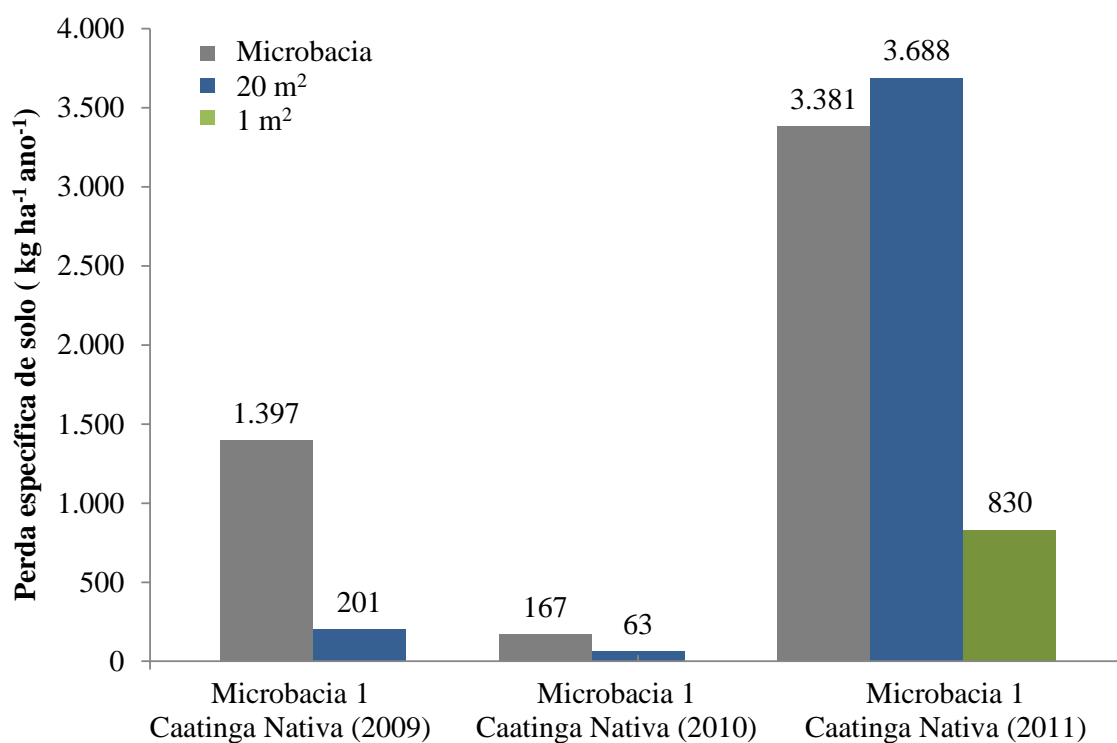


Figura 27 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE.

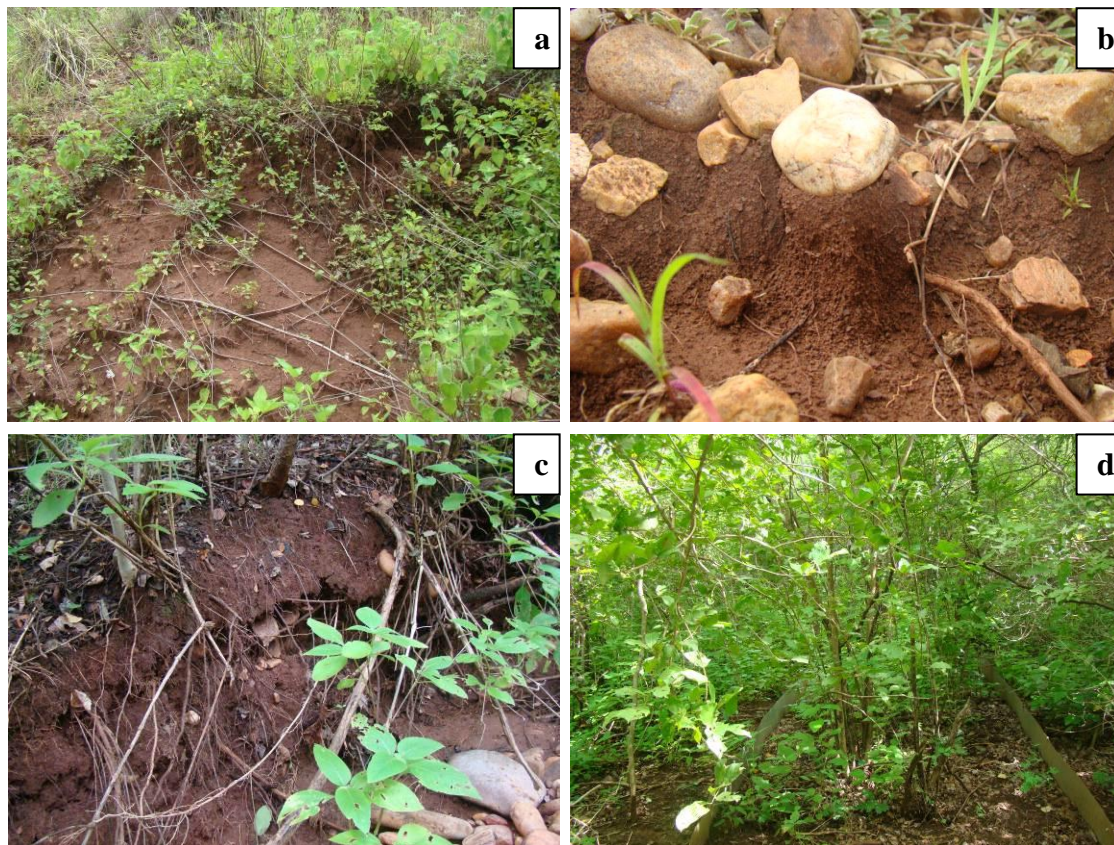


Figura 28 – Ponto de alta produção de sedimento na microbacia B1, desmoronamentos em pontos de maior declividade (a), formação de pedestais nas rochas pela erosão hídrica (b), erosão em curso (c) e parcela de erosão B1 (d).

Já para o ano de 2011, com regime pluviométrico completamente atípico caracterizado por chuvas de alta intensidade e uma boa distribuição temporal (possibilitando a elevação da umidade antecedente do solo), as maiores perdas de solo ocorreram na escala de  $20 \text{ m}^2$  com valor de  $3.688 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Figura 27). Nessa área (B1), em 2011 as perdas de solo foram 8 e 344% maiores na escala de  $20 \text{ m}^2$  em relação às escalas de microbacia e  $1 \text{ m}^2$ , respectivamente. Dessa forma, é válido o pressuposto que as perdas de solo em microescala (parcela de  $1 \text{ m}^2$ ) são reduzidas em relação a parcelas com comprimento de rampa maiores devido à restringida velocidade e acumulação de fluxo. Em relação à microbacia, as perdas de solo na escala de  $20 \text{ m}^2$  são maiores devido à maior probabilidade de deposição de sedimentos ao longo da microbacia.

Para se ter conhecimento das perdas de solo em relação ao escoamento, efetuou-se o cálculo da Descarga Específica de Sedimento (DES), a qual corresponde às perdas de solo por lâmina de água (mm) escoada. Observa-se que para a área B1 –

Caatinga nativa (Figura 29) houve uma maior amplitude nos valores de DES, na escala de microbacia em relação às demais escalas. De forma geral, os maiores valores da mediana ocorreram para a escala de microbacia, com exceção de 2010, significando em maiores valores de DES por evento para a escala de microbacia na maioria dos eventos, justificando a elevação das perdas de solo nessa escala, mesmo com um menor coeficiente de escoamento. Nota-se também para a escala de microbacia no ano de 2010 que no intervalo interquartil (dentro do retângulo) a mediana se encontra mais próximo da linha do primeiro quartil. Tal fato deixa evidente uma existência de valores mais elevados de DES.

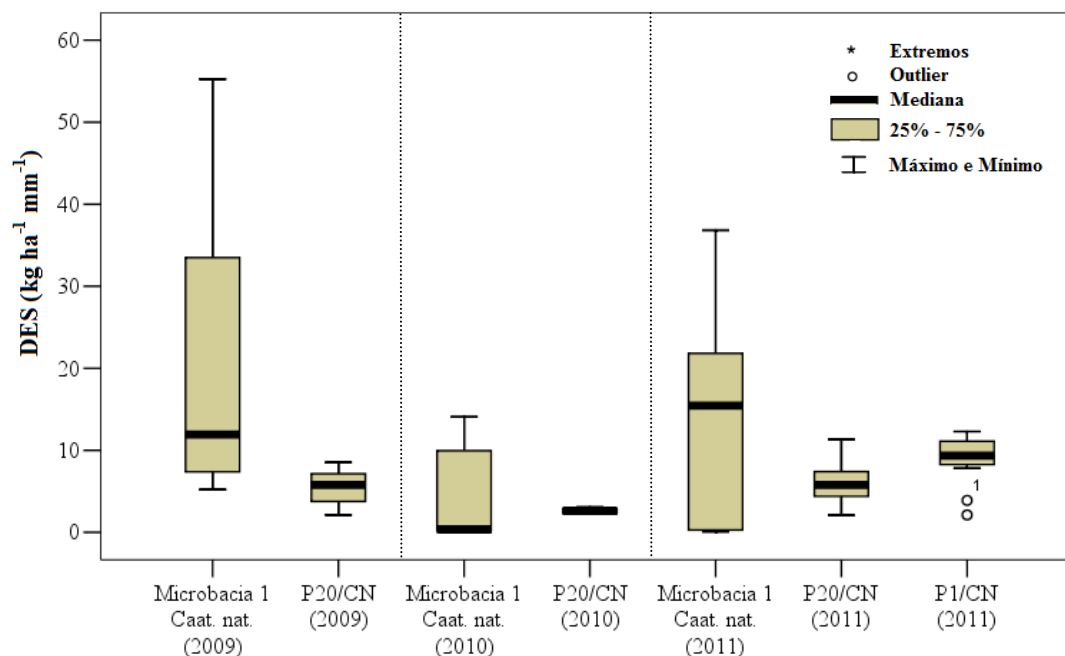


Figura 29 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE.

Ainda na Figura 27, verifica-se que no ano de 2011 a menor perda específica de solo ocorreu na escala de  $1 \text{ m}^2$ , embora a Descarga Específica de Sedimento (DES) mediana tenha sido próximo ao da escala de microbacia (Figura 29), com valor de 9,3 contra  $15,4 \text{ kg}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$  na escala de microbacia. Outro ponto importante é que nessa escala ocorreu a menor amplitude dos valores de DES para 2011, somado ao fato de a escala ter apresentado o menor coeficiente de escoamento (8%) e os valores estarem abaixo da mediana da escala de microbacia, o que justifica a menor perda de solo.

As amplitudes dos DES decresceram com a redução da área de captação (Figura 29). A maior amplitude para a escala de microbacia deve-se aos processos de conectividade sedimentológica, que é caracterizada como a transferência de sedimento de um local para outro, podendo esse ser depositado ao longo da bacia em um dado evento e facilmente transportado por um seguinte. Tal processo gera na bacia zonas produtoras e receptoras de sedimentos, aumentando ou reduzindo o DES ao longo dos eventos de chuva. Esses efeitos de conectividade vão sendo quebrados com a redução da área de captação e comprimento de rampa, apresentando tendência de maior uniformidade dos valores de DES ao longo dos eventos. No entanto, embora medições em pequenas parcelas não reflitam a conectividade do sistema (BOIX-FAYOS *et al.*, 2005), elas são úteis para a compreensão do comportamento dos processos dentro de uma superfície homogênea, como também os efeitos do impacto da gota da chuva no solo. Ressalta-se que o DES também é influenciado pelas características pluviométricas como intensidade e erosividade.

A Figura 30 busca correlacionar a lâmina escoada e perda de solo para os eventos ocorridos nas diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga nativa. O maior coeficiente angular ocorreu na escala de microbacia com valor de 20,26, seguido das escalas de 1 m<sup>2</sup> e 20 m<sup>2</sup>, com valores de 9,98 e 6,10, respectivamente.

O coeficiente angular na escala de microbacia foi duas vezes superior ao da escala de 1 m<sup>2</sup> e 3,3 vezes ao da escala de 20 m<sup>2</sup>, semelhante ao comportamento do DES. Isto é, na escala de microbacia, é necessário uma lâmina de escoamento bem menor que nas demais escalas para a exportação da mesma quantidade de sedimentos. Nessa escala de microbacia o que deve elevar o coeficiente angular é a disponibilidade de sedimentos mobilizados em eventos anteriores, que foram depositados ao longo do percurso. Como nessa escala o coeficiente de escoamento é geralmente o mais baixo, quando há escoamento ocorre o carreamento de grande parte dos sedimentos disponíveis.

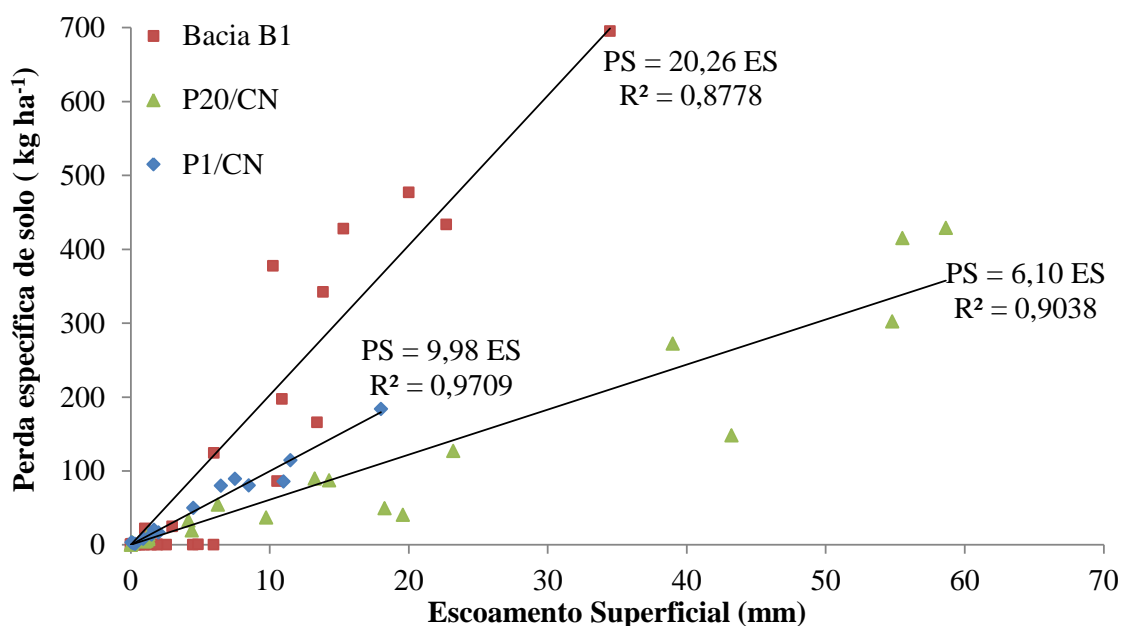


Figura 30 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B1 com Caatinga Nativa, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

O elevado coeficiente de determinação para a escala de 1 m<sup>2</sup> ( $R^2 = 0,97$ ), que foi o maior entre as demais escalas estudadas, reforça o efeito postulado (baixa dispersão dos valores de DES) que o transporte de sedimentos está limitado pela disponibilidade de energia em fluxo de massa para transporte do mesmo. Ou seja, há sedimentos desagregados necessitando apenas da ocorrência de escoamento para ser transportado, e uma vez iniciado o escoamento, o transporte de sedimentos ocorre com o seu potencial máximo (sendo esse dependente das condições de solo, declividade e cobertura vegetal).

#### 5.4.2 Área B2 (raleamento da Caatinga)

As perdas de solo na área B2 (Figura 31), onde foi aplicado o manejo de raleamento da Caatinga, seguiram o mesmo comportamento das perdas de água por escoamento (Figura 21). Observou-se maiores perdas específicas de solo para a escala de parcela de 20 m<sup>2</sup> com valor de 1.600, 154 e 2.327 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, para os anos de



2009, 2010 e 2011 respectivamente. Destacando o ano de 2011, observa-se que as perdas de solo na escala de 20 m<sup>2</sup> foram cerca de 5 e 3.224% maiores em relação a escalas de microbacia e parcela de 1 m<sup>2</sup>, respectivamente, as quais apresentaram perda de solo de 2.221 e 70 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

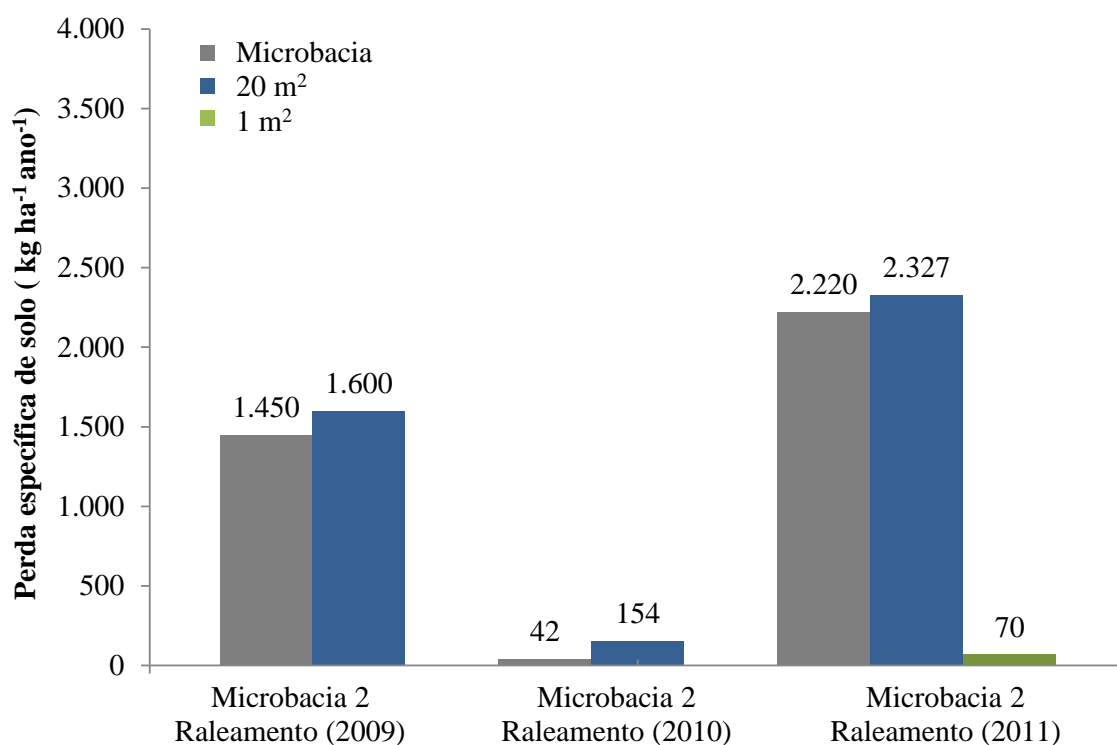


Figura 31 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE.

A área B2 na escala de microbacia, com exceção do primeiro ano de estudo o qual foi aplicado o tratamento de raleamento (2009), apresentou menores perdas de solo em relação à área B1 (Caatinga Nativa). No ano inicial (2009) as perdas de solo da microbacia B2 foram superiores a B1 (Caatinga Nativa) em apenas 4% (Figuras 27 e 31). Já para os anos de 2010 e 2011 (após o estabelecimento da cobertura vegetal pelo manejo) as perdas de solo para a área raleada foram 75 e 34%, respectivamente, menores que na área B1. Esses resultados indicam um maior efeito protetor do tratamento de raleamento quanto à erosão hídrica em relação à vegetação original de Caatinga. O manejo de raleamento reduz o sombreamento, culminando no desenvolvimento do extrato herbáceo e arbóreo remanescente. Essa cobertura do solo

age na redução do impacto direto da gota da chuva no solo. O extrato herbáceo também atua fortemente como barreira para o escoamento, aumentando o tempo de oportunidade do fluxo para infiltração, e reduzindo a sua energia cinética que culmina da deposição de sedimentos ao longo da vertente (RODRIGUES, 2009).

O maior valor mediano da DES (Descarga Específica de Sedimento), semelhante ao manejo de Caatinga nativa, foi mensurado para a escala de microbacia, seguido das escalas de 20 m<sup>2</sup> e 1 m<sup>2</sup>, com valores de mediana variando entre 13,0 e 1,9 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> (Figura 32).

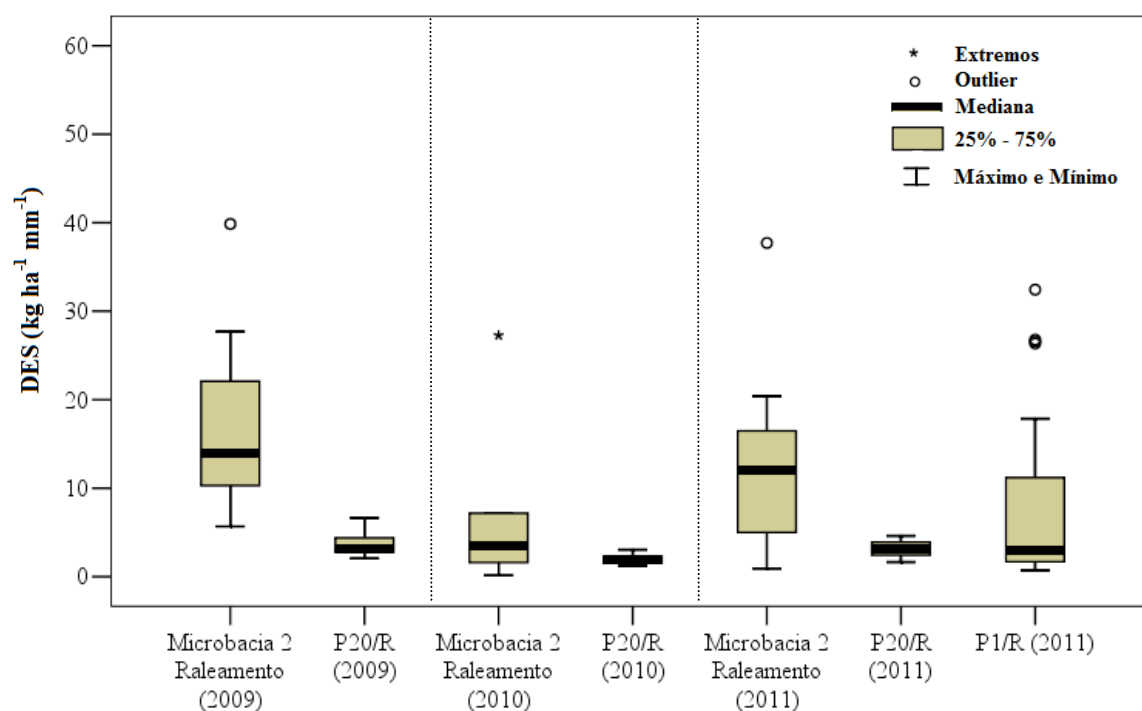


Figura 32 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE.

Na escala de microbacia ocorreram as maiores amplitudes das DES, sendo as maiores registradas no ano de 2009 com valores variando entre 5,7 a 39,9 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> (Figura 32). Apesar dessa escala de microbacia apresentar maiores valores de DES em relação à escala de 20 m<sup>2</sup>, as perdas de solo total foram menores devido ao menor coeficiente de escoamento, porém, esses maiores valores de DES foram suficientes para elevar as perdas de solo a próximo da escala de parcela. A maior variabilidade do escoamento e das taxas de erosão nessa escala de microbacia é atribuída às propriedades da superfície do solo (por exemplo: cobertura de pedra, crostas, rugosidade da

superfície) que regulam o escoamento e a erosão (CALVO-CASES *et al.*, 2003; ARNAU-ROSALEN *et al.*, 2008).

Nota-se que no intervalo interquartilico (dentro do retângulo), para a escala de 1 m<sup>2</sup> a mediana se encontra próxima da linha do primeiro quartil (Figura 32). Tal fato deixa evidente uma existência de eventos com valores elevados de DES, porém as perdas de solo nessa escala foram as menores por conta da baixa geração de escoamento na mesma.

Já na escala de 20 m<sup>2</sup> ocorreu a menor amplitude do DES, com valores de mediana semelhantes aos da escala de 1 m<sup>2</sup>. Como os coeficientes de escoamento para a escala de 20 m<sup>2</sup> foram os maiores da área B2, resultou em maior perda de solo nessa escala para a área. Além da baixa amplitude do DES, para a escala de 20 m<sup>2</sup> observa-se alto coeficiente de determinação entre as perdas de solo e o escoamento com R<sup>2</sup> de 0,90 (Figura 33), indicando elevada dependência das perdas de solo pelo escoamento.

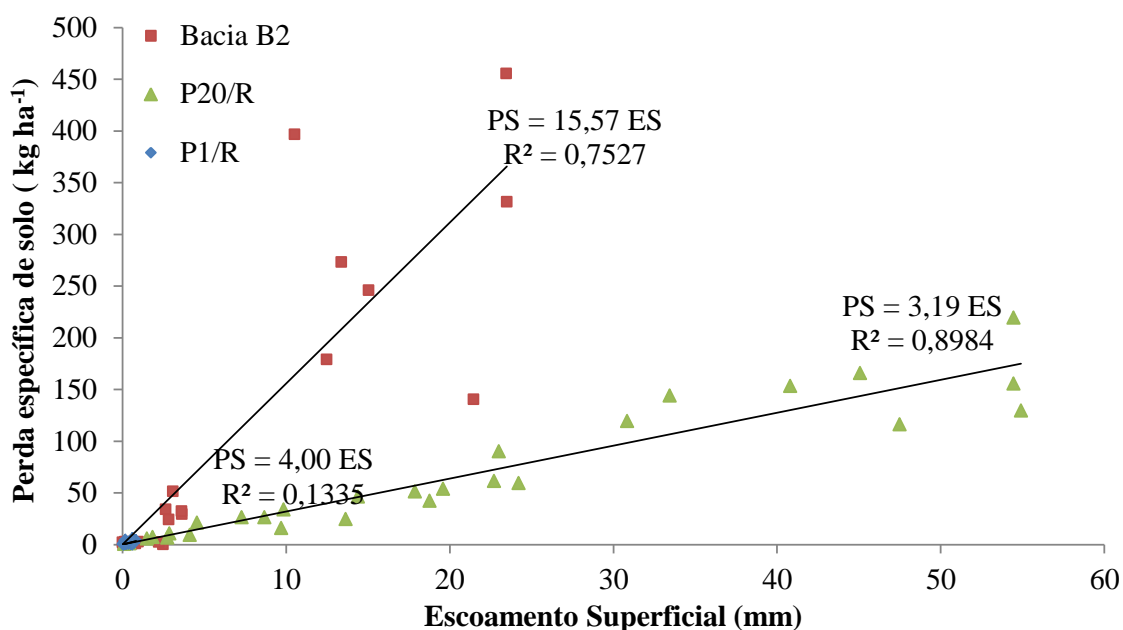


Figura 33 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B2 com manejo de Raleamento da Caatinga, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

Os valores dos coeficientes angulares da reta entre lâmina escoada e perda de solo para as diferentes escalas espaciais, na área B2, variaram de 15,57 a 4,00 para as escalas de microbacia e 1 m<sup>2</sup>, respectivamente. Esses valores representam o comportamento do transporte de sedimento na área, tornando-se assim, dependente do

escoamento. Analisando conjuntamente para a escala de 20 m<sup>2</sup> o coeficiente de escoamento (que foi o maior entre as escalas espaciais) e o coeficiente angular com valor de 3,19, justifica-se a maior perda de solo nessa escala, mesmo com menor DES mediano.

Na escala de 1 m<sup>2</sup> com manejo de raleamento, diferindo da área com Caatinga, verifica-se baixo coeficiente de determinação (perda de solo x lâmina escoada) com valor do R<sup>2</sup> de apenas 0,14. O extrato herbáceo por conta do tratamento de raleamento promove grande proteção ao solo, reduzindo os efeitos do impacto da gota da chuva no solo e diminuindo o escoamento ocasionando em baixa disponibilidade de energia para transporte.

#### **5.4.3 Área B3 (desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho)**

Para os anos estudados na área B3 (Caatinga nativa e manejo de desmatamento/enleiramento/cultivo de milho), as maiores perdas de solo foram registradas para a escala de 20 m<sup>2</sup>, com valores de 179,8; 223,8 e 1.743,5 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, para o primeiro e segundo ano com CN e o terceiro ano com EC, respectivamente (Figura 34). Maiores perdas específicas de solo após o manejo de uso do solo (2011) de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho (EC), foram observados em relação ao manejo inicial de Caatinga (Figura 34). Observa-se, por exemplo, na escala de bacia que as perdas específicas de solo foram incrementadas em 583 e 864%, em relação a 2009 e 2010, respectivamente. Dessa forma é necessária a continuação das investigações para uma melhor análise da sustentabilidade desse manejo, uma vez que os presentes resultados estão apontando para baixa conservação dos recursos naturais. Mudanças no comportamento hidrológico e sedimentológico como consequência da ação antrópica tem sido reportada por vários autores, que apontam a necessidade de adoção de estratégias, como manutenção da cobertura vegetal, como forma de melhor gerenciamento dos recursos solo e água (ALBUQUERQUE *et al.*, 2002).

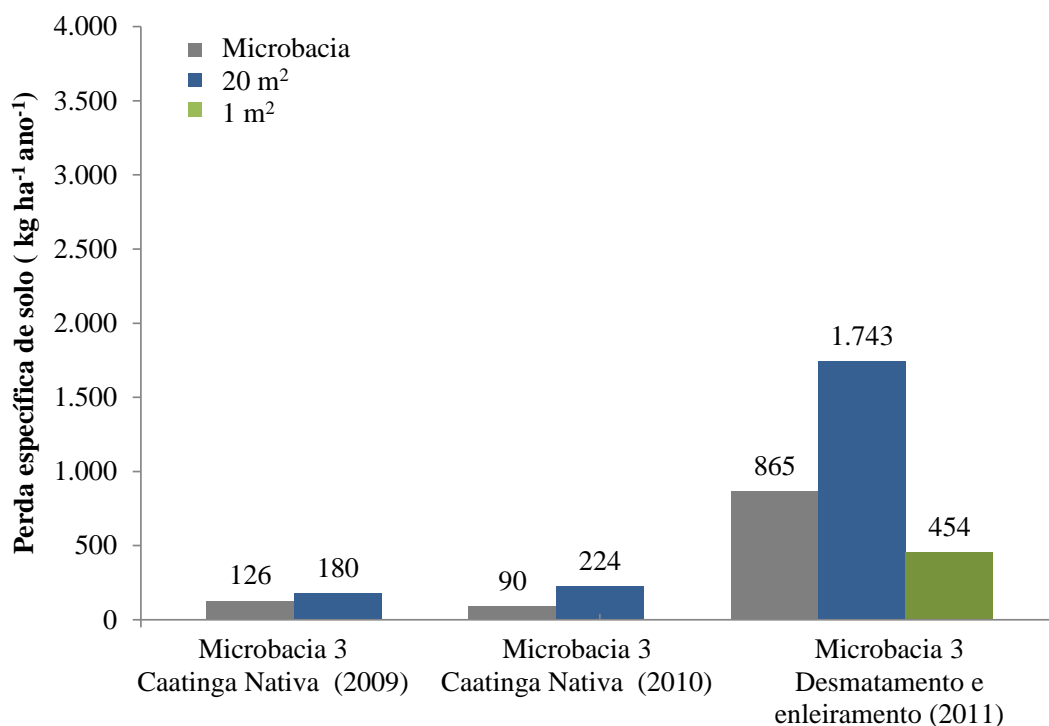


Figura 34 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE.

A área B3 apresenta uma peculiaridade em relação às demais áreas, que é o diferente tipo de solo. O solo na B3 (Luvissole Crômico Carbonático Típico), contém maior percentual de areia na sua camada superficial em relação ao Vertissolo das áreas B1, B2 e B4. Solos com maior teor de areia são mais susceptíveis à desagregação, porém necessitam de uma maior quantidade de energia para transporte em relação a solo mais argiloso. Além disso, os solos mais arenosos possuem maior condutividade hidráulica saturada (Tabela 5), reduzindo assim o coeficiente de escoamento superficial e conseqüentemente, menor capacidade de transporte de sedimentos, o que pode ser visto na Figura 35. Esse comportamento pode ser observado comparando as perdas de solo na área B3 no período inicial com Caatinga nativa com as perdas na área B1 (Caatinga nativa). A área B1-CN (Figura 26) no primeiro ano de estudo 2009 perdeu 1.004% e 12% mais sedimentos do que a área B3 (período Caatinga nativa), para as escalas de microbacia e 20 m<sup>2</sup>, respectivamente.

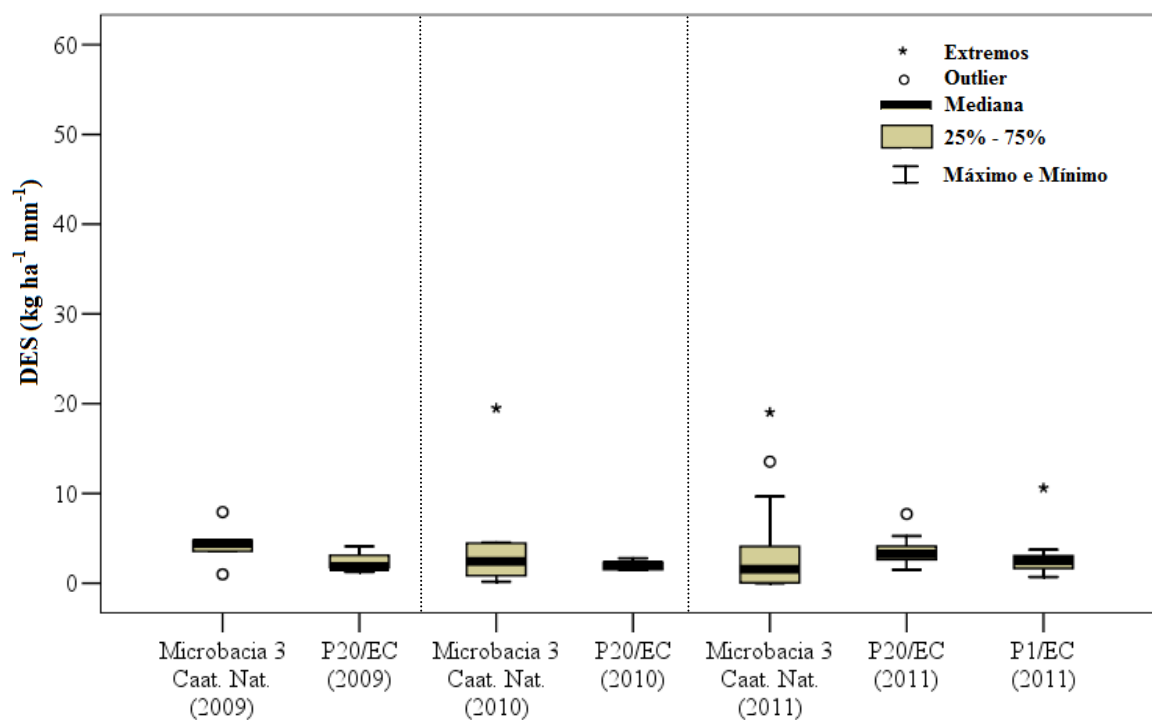


Figura 35 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE.

De acordo com a Figura 35, observam-se menores valores de DES em comparação com as áreas B1 e B2 (Figuras 29 e 32). Os valores medianos de DES variaram entre 1,6 e 4,5  $\text{kg}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ . Houve ligeiro aumento da amplitude dos valores de DES após o tratamento (2011), para as diferentes escalas, com aumento do coeficiente de escoamento, e culminando em maiores perdas de solo.

Os altos coeficientes de determinação ( $R^2 > 0,89$ ) entre escoamento e perdas de solo, para as diferentes escalas espaciais para a área B3, semelhante às áreas anteriores, indicam que as perdas de solo são também dependentes do escoamento (Figura 36). Esses resultados parecem indicar que em regiões semiáridas, independentemente do manejo do solo ou da escala espacial de mensuração, as perdas de solo são limitadas pela capacidade de transporte. Medeiros *et al.*, (2010) encontraram resultados semelhantes em região semiárida cearense, porém com base em modelagem.

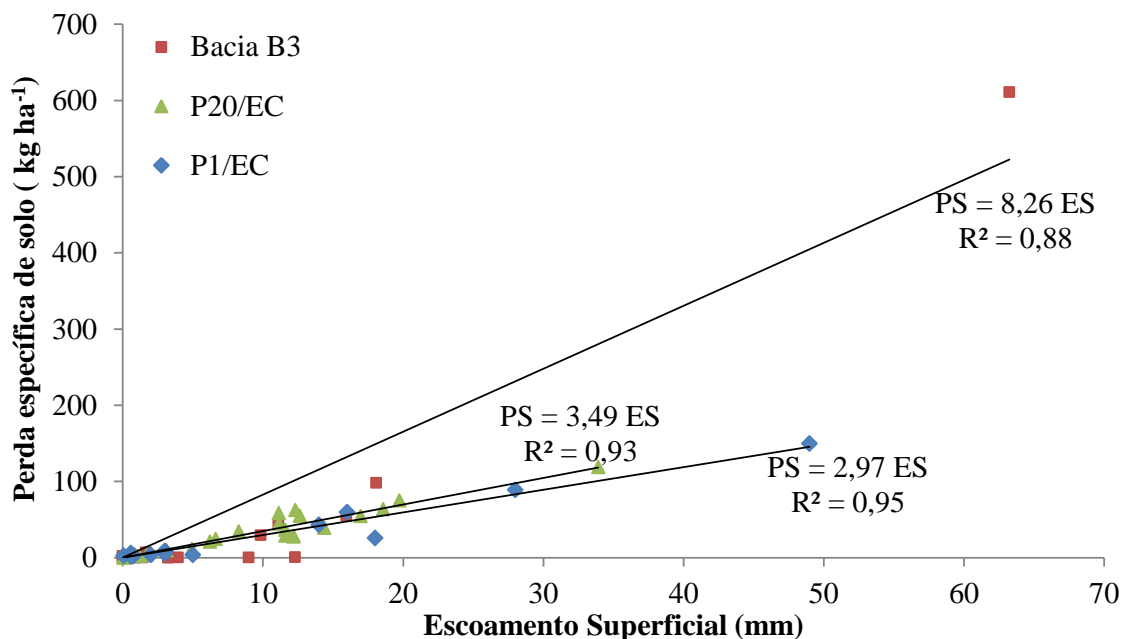


Figura 36 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B3 com manejo de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

#### 5.4.4 Área B4 (desmatamento/queimada/cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt)

A área B4 apresenta três diferentes períodos de manejo do solo ao longo dos três anos de estudo; o inicial com Caatinga nativa (2009), o primeiro ano após o desmatamento, queima e cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt (QP) (2010), e o segundo ano após o manejo de QP (2011). De acordo com a Figura 37 que apresenta as perdas de solo para as diferentes escalas e períodos, para o segundo ano após o manejo, as maiores perdas de solo ocorreram na escala de 20 m<sup>2</sup>. Na escala de 20 m<sup>2</sup> as perdas de solo são maiores comparadas com a escala de microbacia devido, principalmente, ao aumento da probabilidade da presença de uma rota preferencial de infiltração com o crescimento do tamanho da área de captação.

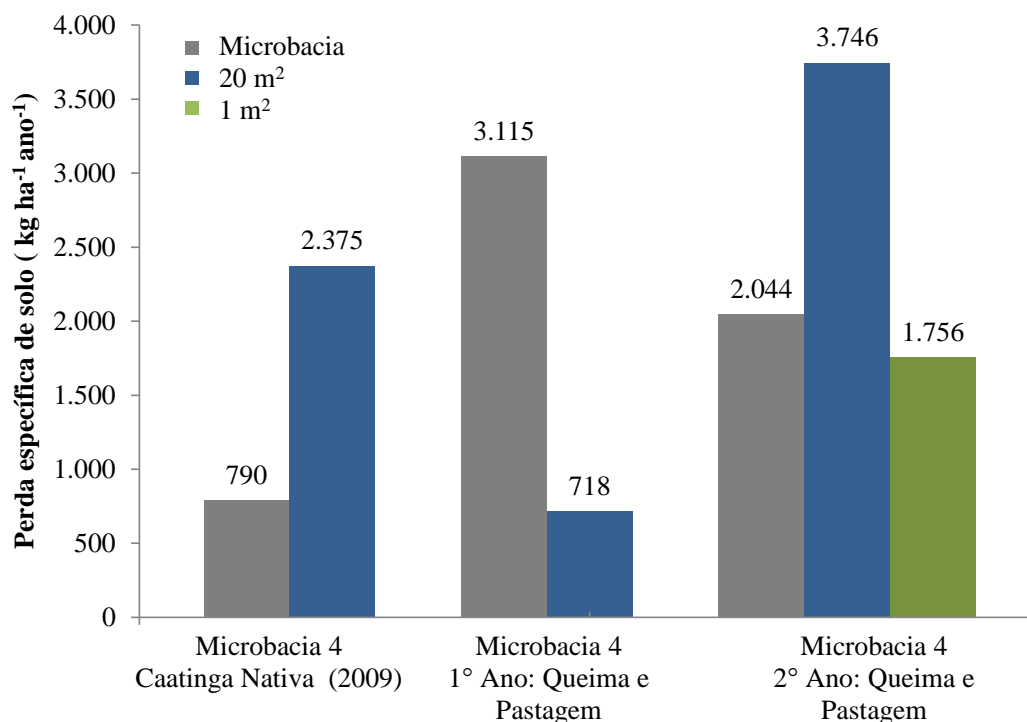


Figura 37 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento queima e cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt no primeiro e segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE.

Na escala de microbacia, houve incremento de 294% nas perdas de solo no primeiro ano (2010) após o tratamento de queimada em relação ao período anterior com Caatinga nativa (Figura 37). Esse incremento na produção de sedimentos foi atribuído ao tratamento QP (desmatamento/queimada/cultivo de gramínea), que no seu primeiro ano resultou em maior exposição do solo ao agente erosivo (nas primeiras chuvas o solo estava totalmente desprotegido), favorecendo os processos erosivos de desagregação e transporte de partículas de solo. Outro fator que reforça o efeito maximizando das perdas de solo no primeiro ano após o manejo, foi a menor altura pluviométrica para 2010 sendo 8% menor que a média da região e com menor índice de erosividade. Comportamento semelhante já foi registrado para outras áreas após a aplicação de queimadas (THOMAZ, 2009; GAFUR *et al.*, 2003; ALBUQUERQUE *et al.*, 2002).

No período referente ao segundo ano após o manejo de QP, para a escala de microbacia ocorreu redução das perdas de solo em 52% em relação ao período anterior, apesar da altura precipitada e da erosividade no terceiro período ter sido 72% e 135% maior, respectivamente, do que no período anterior. Esses resultados são devidos à estabilização da cobertura vegetal na área no segundo ano após o tratamento.



A maior DES para a área B4 foi registrada para a escala de 20 m<sup>2</sup> no período com Caatinga nativa, com valor de 10,2 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, porém com elevada amplitude dos valores variando entre 2,7 e 27,6 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup> (Figura 38). Dessa forma, apesar do coeficiente de escoamento no período com Caatinga nativa na escala de microbacia ter sido 7% menor do que na escala de 20 m<sup>2</sup>, a perda específica de solo para a parcela de 20 m<sup>2</sup> foram 201% maiores.

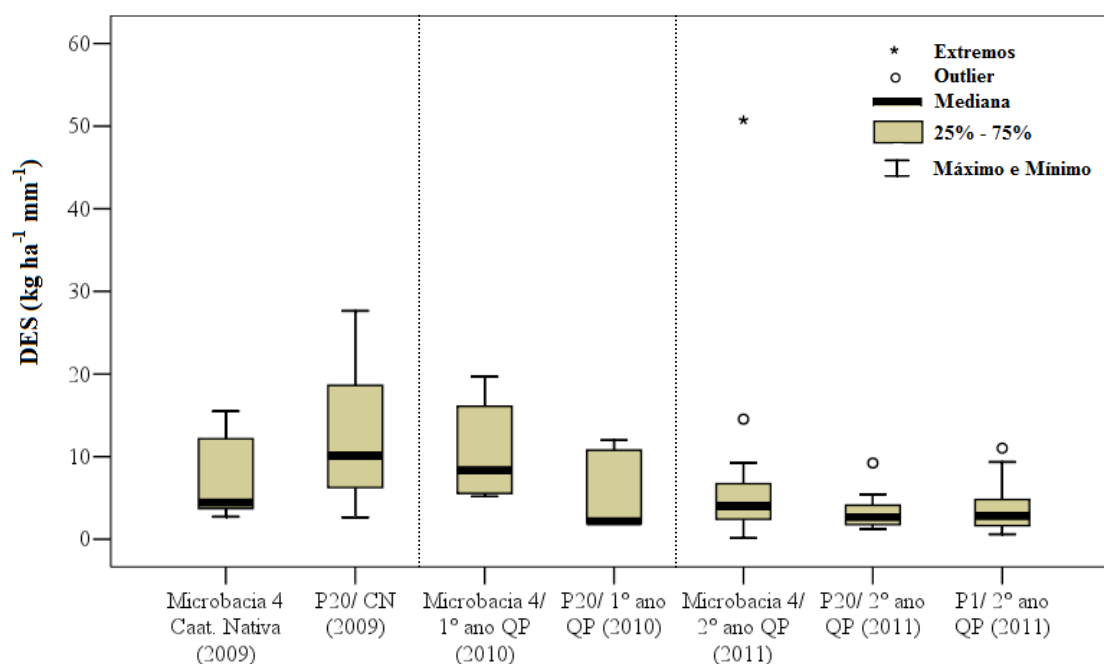


Figura 38 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo inicial de Caatinga seguido de desmatamento, queima e cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt no primeiro e segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE.

Para o primeiro ano após a QP, ocorreu um aumento de cerca de duas vezes no valor do DES mediano para a escala de microbacia (Figura 38), em relação ao período com CN, culminado assim, como comentado anteriormente, na elevação das perdas de solo nesse período. Porém na escala de 20 m<sup>2</sup>, ocorreu uma redução no DES, uma vez que esse nível de escala não reflete processos que só ocorrem na escala de microbacia, como a redefinição de curso, formação de pequenas voçorocas e etc.

Já para o segundo ano após o manejo de QP, onde a cobertura vegetal composta de gramínea (*Andropogon gayanus* Kunt) já estava bem estabelecida, houve maior uniformidade nos valores de DES, variando de 4,0; 2,7 e 2,8 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>, para as escalas de microbacia, 20 m<sup>2</sup> e 1 m<sup>2</sup>, respectivamente (Figura 38).

De acordo com a Figura 39 as perdas específicas de solo para o tratamento de QP apresentaram elevada proporcionalidade ao escoamento, semelhante aos demais tratamentos, com valores de  $R^2$  variando entre 0,77 e 0,96. A maior declividade da reta para o manejo de QP, também ocorreu para a escala de microbacia (análogo aos demais manejos estudados), com valor de 5,04; entretanto com menores perdas de solo nessa escala em relação à de  $20 \text{ m}^2$ , por conta do menor coeficiente de escoamento.

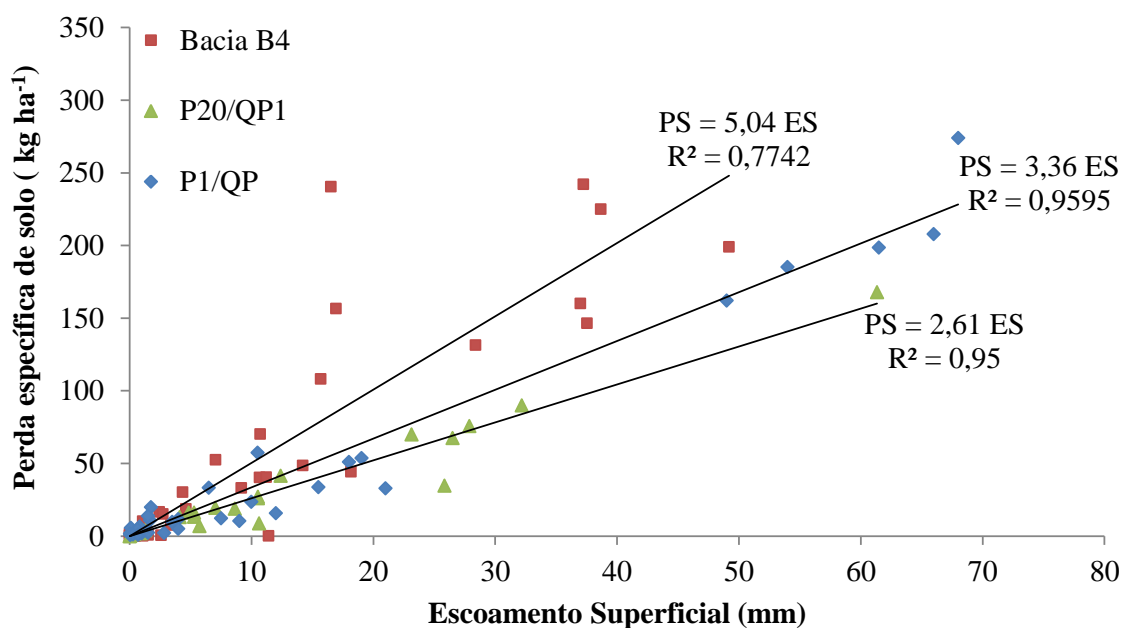


Figura 39 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a área B4 com manejo de desmatamento, queima e cultivo de *Andropogon gayanus* Kunt no segundo ano, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

#### 5.4.5 Parcelas com solo nu

As maiores perdas específica de solo para as parcelas de solo nu (Luvissole e Vertissolo) ocorreram, semelhantes aos demais tratamentos, na escala de  $20 \text{ m}^2$  em relação às parcelas de  $1 \text{ m}^2$ , sendo 2 e 287% maior para as parcelas com Luvissole e Vertissolo, respectivamente (Figura 40).

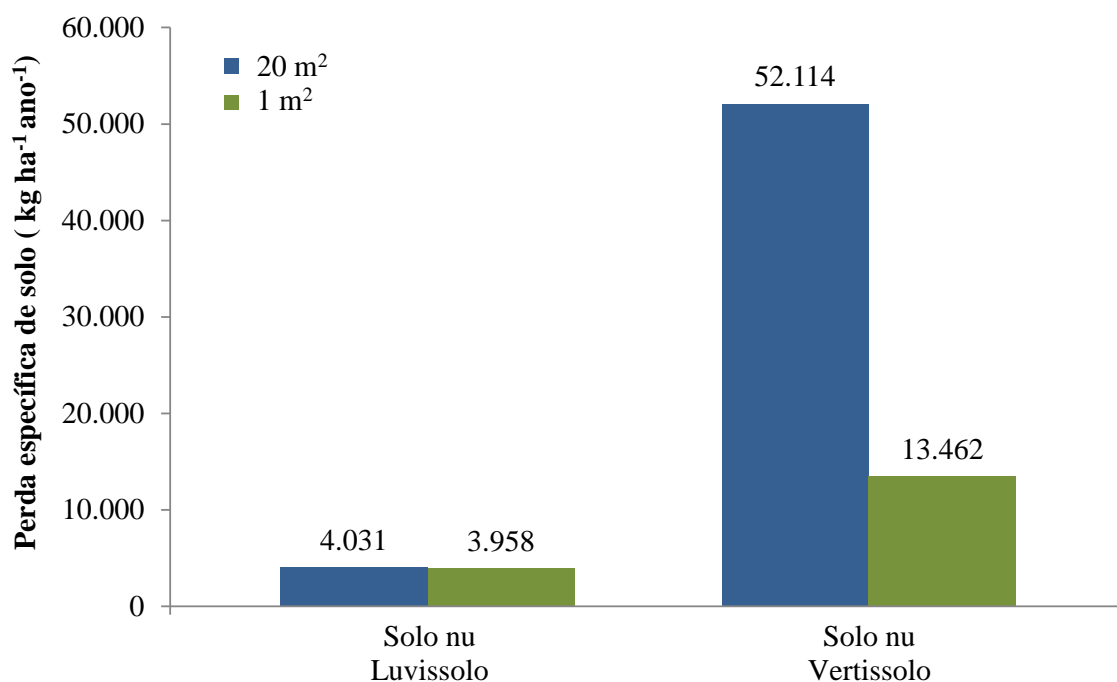


Figura 40 – Perda específica de solo total anual em diferentes escalas espaciais, para as parcelas de erosão com solo nu em área com Luvissolo e Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

Na escala de 20 m<sup>2</sup>, observa-se na Figura 40 que a parcela com Vertissolo perdeu 1.193% mais de solo que a parcela de Luvissolo, com valores de perdas variando de 52.114 a 4.031 kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Essa elevada diferença entre as parcelas deve-se às diferenças texturais dos solos estudados, uma vez que solo com maior teor de areia necessita de maior energia para transporte.

As maiores amplitudes da DES para cada escala foram observadas no Vertissolo, conforme a Figura 41. Na escala de 20 m<sup>2</sup>, a descarga específica de sedimento foi maior na área com Vertissolo. Esse comportamento diferenciado para a região ocorre devido ao fato dos presentes resultados indicarem que as perdas de solo na região são limitadas pelo escoamento, independente da cobertura vegetal, ou seja, as boas correlações entre lâmina escoada e perda de solo indicam que há solo desagregado necessitando apenas um fluxo de escoamento para transporte. Como o Vertissolo possui um maior teor de argila, requerendo assim menos energia para transporte em relação ao Luvissolo, resulta em maiores perdas de solo.

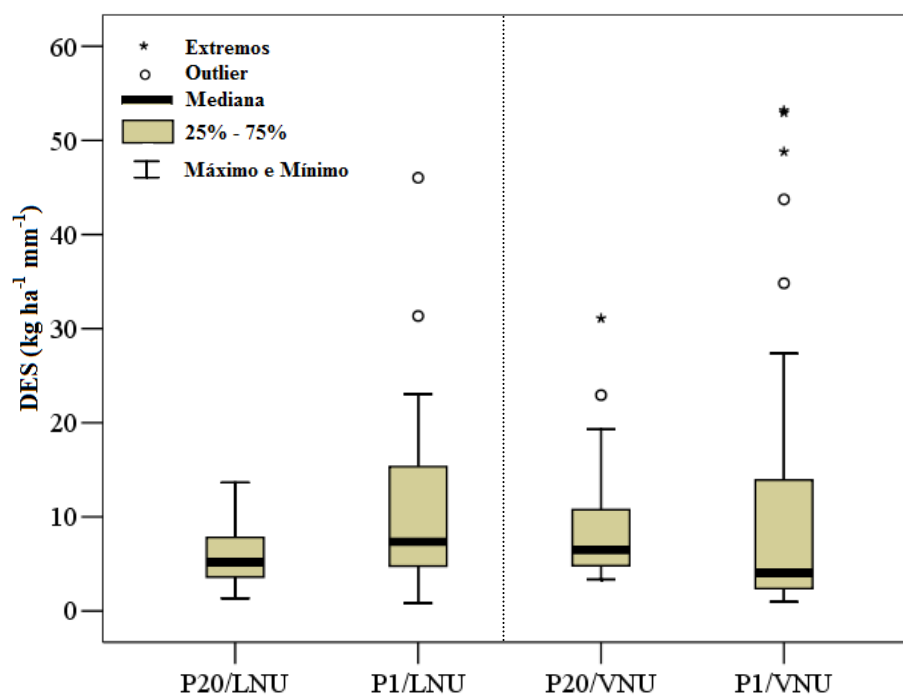


Figura 41 – Descarga Específica de Sedimento (DES) em diferentes escalas espaciais, para as parcelas de erosão com solo nu em área com Luvissole e Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

Para as parcelas no Vertissolo, nota-se que no intervalo interquartílico (dentro do retângulo), a mediana encontra-se mais próximo da linha do primeiro quartil (Figura 41). Tal fato deixa evidente a existência de elevados valores do DES, para o presente tipo de solo. Nessa área observa-se a existência também de um maior número de outliers, sendo esses valores ocorrendo nos eventos pluviométricos de maior intensidade e poder erosivo, o que resulta em maior desagregação e maior fluxo de transporte.

Os maiores valores dos coeficientes angular da reta entre lâmina escoada e perda de solo ocorreram na escala de 1 m<sup>2</sup> e com maior valor para a parcela com Vertissolo, em concordância com os resultados do DES, sendo esses valores de 11,57 e 27,15 para as parcelas com Luvissole e Vertissolo, respectivamente (Figuras 42 e 43).

Os menores valores do R<sup>2</sup> foram registrados na área com Vertissolo (Figura 43), uma vez que as parcelas com solo nu produzem maiores coeficiente de escoamento, resultando em elevadas perdas de solo. Depois de certo tempo, é possível que haja escassez de material desagregado para ser transportado (OLLESCH e VACCA, 2002; BOIX-FAYOS *et al.*, 2007), reduzindo assim o coeficiente de determinação entre perda

de solo e escoamento. Nesse caso, os fatores determinantes da erosão, como o poder erosivo da chuva, podem ter maior influência sobre as perdas de solo do que o próprio escoamento.

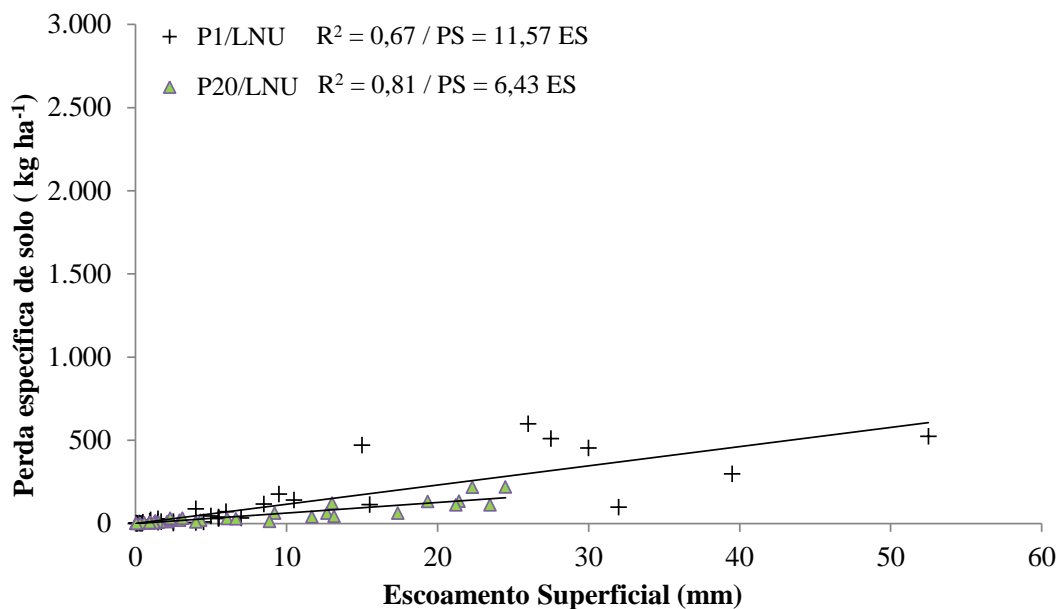


Figura 42 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a parcela de erosão com solo nu em área com Luvissole, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

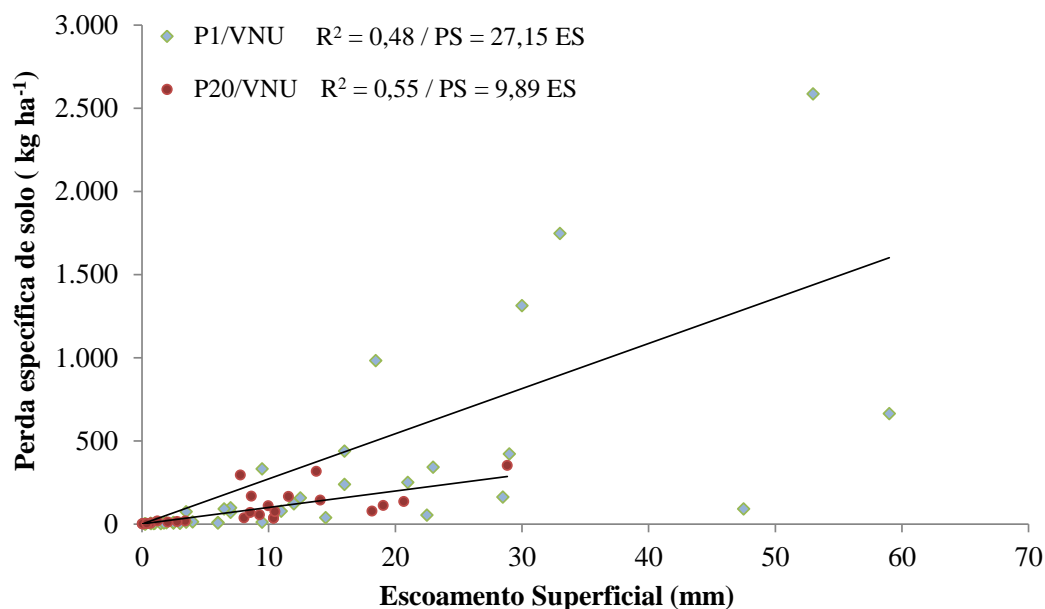


Figura 43 – Relação entre lâmina escoada e perda específica de solo para as diferentes escalas espaciais, para a parcela de erosão com solo nu em área com Vertissolo, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

## 5.5 Transferência de escala

Os resultados brutos permitem iniciar uma discussão sobre os vários aspectos da transferência de escala, extrapolação entre escoamento e erosão medidos a partir de microparcelas de  $1 \text{ m}^2$  para microbacias.

### 5.5.1 Comparações $20 \text{ m}^2 / 1 \text{ m}^2$

As discussões sobre a transferência de escala de  $1 \text{ m}^2$  para  $20 \text{ m}^2$  é principalmente uma questão metodológica: em ambas as parcelas preocupa-se com medições locais e o problema é determinar o tamanho mínimo da parcela que permita que os processos elementares para a erosão ocorram e para avaliar a área mínima representativa de um determinado estado da superfície (LE BISSONNAIS *et al.*, 1998). Em geral, as relações de escalas (Figuras 44 e 45) entre as parcelas de  $20 \text{ m}^2$  e  $1 \text{ m}^2$  para o escoamento e as perdas de solo apresentaram valores acima de 1. Esses valores da relação de escalas evidenciam que as parcelas de  $1 \text{ m}^2$  tendem a apresentar menores valores de perdas de solo e escoamento, comparado com as parcelas de  $20 \text{ m}^2$ , devido à menor velocidade do fluxo e da limitada capacidade de transporte para um comprimento de rampa de apenas 1 metro. O fator de escala está relacionado à microtopografia e comprimento da parcela de erosão: com o aumento do comprimento da rampa, a profundidade de escoamento superficial aumenta devido ao escoamento acumulado ao longo da encosta, e uma grande parte da superfície é submersa. Esta limitação para a extrapolação de medições de erosão das pequenas parcelas para superfícies maiores foi observada anteriormente por diversos autores (LE BISSONNAIS *et al.* 1998; CHAPLOT e LE BISSONNAIS, 2000). Pesquisa no sudeste da Espanha demonstrou que fatores de controle do movimento da água e sedimentos variam de acordo com uma gama de escalas espaciais, mas estão relacionados através de escalas, e as conexões são

complexas (CAMMERAAT, 2002; CALVO-CASES *et al.*, 2003; DE VENTE e POESEN, 2005).

Uma ligeira tendência de aumento da taxa de erosão medida em campo com o aumento da área de contribuição foi observada por Boix-Fayos *et al.* (2005), para dados coletados em diferentes escalas em Murcia e Alicante na Espanha. A influência do comprimento da área de drenagem nas taxas de erosão foi analisada também por outros autores em bacias do Mediterrâneo (DE VENTE e POESEN, 2005).

A maior relação entre escala (Parcela de 20 m<sup>2</sup>/ Parcela de 1 m<sup>2</sup>) para o escoamento foi verificada para a área B2 raleada (B2/R), com valor de 63,08. Esse resultado foi cerca de 1.469; 2.176; 4.601; 3.015 e 4.847%, maior em relação à área B1/CN (Caatinga nativa), B3/EC (manejo de enleiramento e cultivo de milho), B4/QP (queima e pastagem), P/LNU (solo nu – Luvissole) e P/VNU (solo nu - Vertissolo) respectivamente (Figura 42). O extrato herbáceo favoreceu a infiltração, provocando uma redução do escoamento superficial na pequena escala. Com o aumento da área de contribuição, a água infiltra nas cabeceiras escoando subsuperficialmente e aflora em algum local entre as escalas de 1 m<sup>2</sup> e 20 m<sup>2</sup>, contribuindo para o escoamento superficial nessa última.

A primeira e terceira menor relação entre escala (Parcela de 20 m<sup>2</sup>/ Parcela de 1 m<sup>2</sup>) para o escoamento foram mensuradas nas parcelas de solo nu para a área com Vertissolo e Luvissole, respectivamente (Figura 42). Esses resultados para as parcelas de solo nu ocorrem devido a inexistência da interferência da cobertura vegetal. Já na área B4/QP (Segundo ano após a queima e cultivo de pastagem) que apresentou a segunda menor relação, com valor de 1,34, deve-se à boa representação da cobertura vegetal (*Andropogon gayanus* Kunt) em ambas as escalas de parcelas (Parcela de 1 e 20 m<sup>2</sup>), conduzindo o fator para próximo as condições de solo nu.

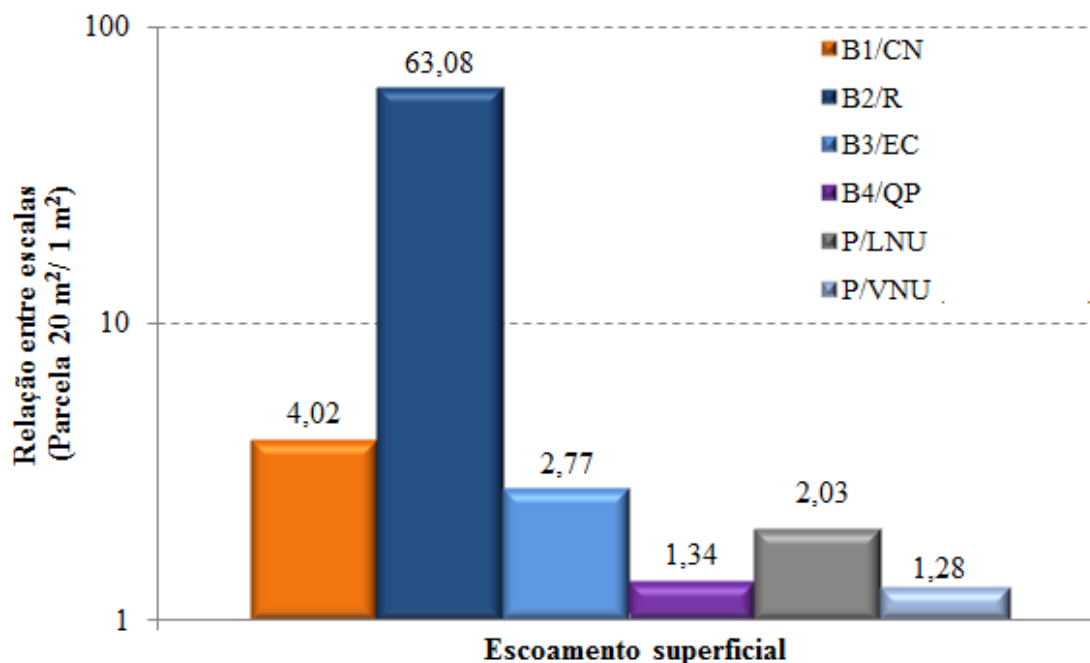


Figura 44 – Razão entre escalas espaciais para o coeficiente de escoamento superficial, entre as parcelas de 20 m<sup>2</sup>/ parcelas de 1 m<sup>2</sup>, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

Analisando os valores da relação entre escala (Parcela de 20 m<sup>2</sup>/ Parcela de 1 m<sup>2</sup>) para as perdas de solo, obteve-se resultado semelhante ao comportamento das perdas de água, com maior valor para a área B2/R (raleamento) (Figura 45). Para a área B1 com Caatinga nativa, obteve-se a segunda maior relação de escala nas perdas de solo, com valor de 4,44. A área B1/CN é caracterizada por grande heterogeneidade de cobertura, sendo que em pontos com maior densidade arbórea reduz-se o extrato herbáceo por conta do sombreamento, sendo assim de difícil representatividade em uma escala de 1 m<sup>2</sup>.

O menor valor da relação entre escala (Parcela de 20 m<sup>2</sup>/ Parcela de 1 m<sup>2</sup>) para as perdas de solo ocorreu nas parcelas de Luvissole nu (P/LNU) com valor de 1,02 (Figura 45). Isso ocorre devido à necessidade de uma maior quantidade de energia para transporte das partículas desagregadas devido o maior teor de areia. Dessa forma, para a escala de 20 m<sup>2</sup>, com comprimento de rampa de 10 m, ocorre a desagregação das partículas de solo pelo golpe direto da gota da chuva e por fluxo de escoamento, porém de acordo com o poder de transporte do escoamento há uma maior deposição de sedimentos ao longo da rampa. Já para a escala de 1 m<sup>2</sup> os efeitos de deposição na rampa (1,13 m) são menores uma vez que as perdas são controladas pela capacidade de



transporte, contudo a desagregação como já mencionado é ocasionada basicamente pelo impacto direto da gota da chuva.

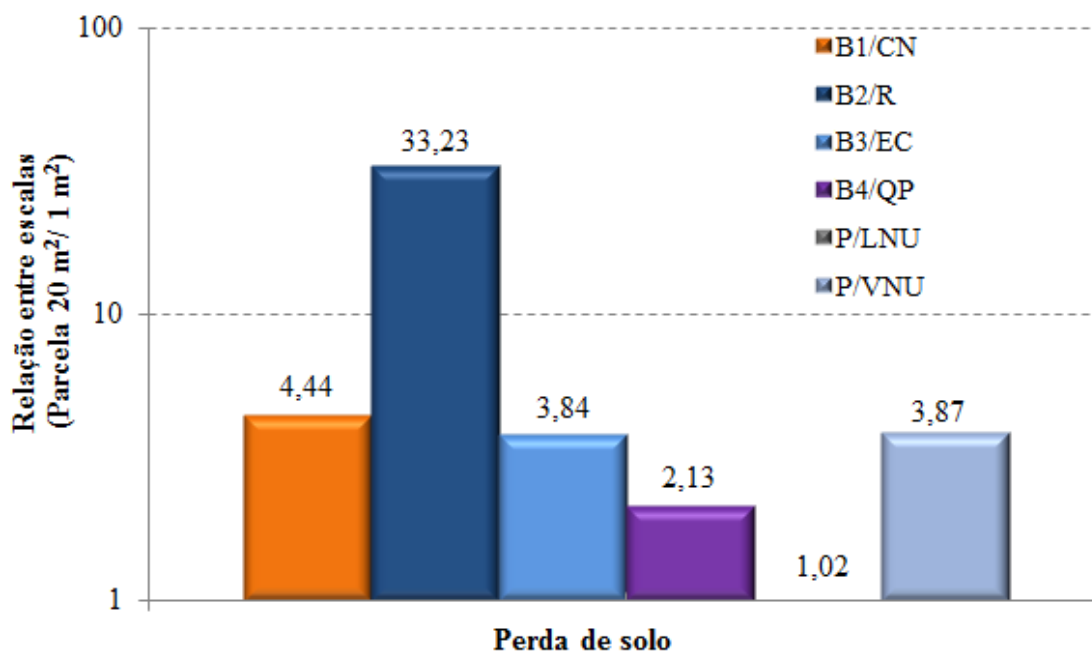


Figura 45 – Razão entre escalas espaciais para a perda de solo, entre as parcelas de 20 m<sup>2</sup> / parcelas de 1 m<sup>2</sup>, na estação experimental de Iguatu-CE no ano de 2011.

### 5.5.2 Comparações Microbacias/ 20 m<sup>2</sup>

Para se quantificar o efeito de escala sobre o escoamento (Figura 46), foram calculadas também as relações entre valores mensurados na escala de microbacia sobre as perdas na escala de parcela de erosão de 20 m<sup>2</sup>. Os valores das relações para o escoamento, com exceção das áreas B1 e B4 no ano de 2009 com Caatinga nativa (CN), apresentaram-se menores que um, variando entre 0,08 e 0,72, o que representa maiores coeficientes de escoamento na escala de 20 m<sup>2</sup>, comportamento semelhante aos observados por diferentes pesquisadores em outras regiões (BOIX-FAYOS *et al.*, 2007; CHAPLOT e LE BISSONNAIS 2000; LE BISSONNAIS *et al.* 1998). Esse fato deve-se principalmente ao aumento da probabilidade da presença de rotas preferenciais de infiltração com o aumento da área e a outros processos que ocorrem na escala de

microbacias e bacias, tais como a circulação do escoamento em canais, pontos de alta infiltração (depressões) e etc.

As menores relações entre as escalas de microbacia e parcela de 20 m<sup>2</sup> para o escoamento, foram detectadas para a área B2 raleada (B2/R) ao longo dos três anos de estudo com valores de 0,16; 0,10 e 0,19 para 2009, 2010 e 2011, respectivamente. Como foi explicado anteriormente na seção escoamento superficial, a escala de microbacia na área B2/Raleada apresentou menor escoamento superficial devido ao elevado desenvolvimento da cobertura vegetal (extrato herbáceo) que implicou no favorecimento da infiltração da água no solo, pela criação de barreiras ao escoamento. Já para a escala de 20 m<sup>2</sup>, além da difícil representação da heterogeneidade do sistema na microbacia, a mesma apresentou a maior declividade entre as parcelas estudadas com valor de 13,5% (Tabela 8) contra 10,6% para a escala de microbacia, que pode ter contribuído para o aumento do escoamento nessa escala.

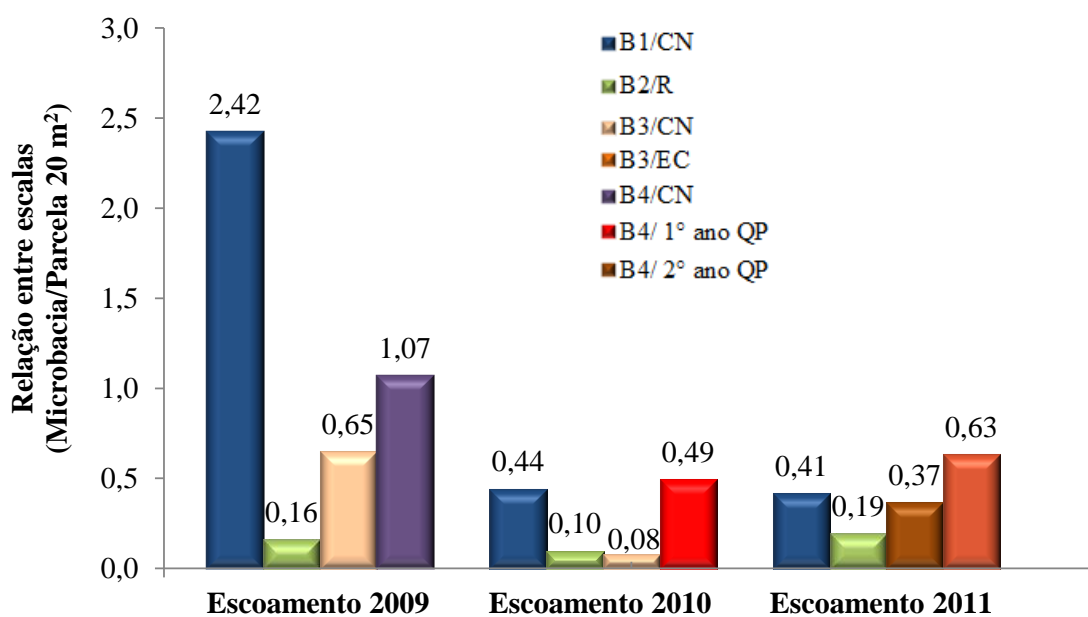


Figura 46 – Razão entre escalas espaciais para o coeficiente de escoamento superficial, entre as microbacias / parcelas de 20 m<sup>2</sup>, para o período estudado, na estação experimental de Iguatu-CE.

A área B3, durante os dois primeiros anos de estudo com cobertura de Caatinga nativa, apresentou relações de escala para o escoamento com valores de 0,65 e 0,08 para 2009 e 2010, respectivamente, com regimes pluviométricos diferentes (2009 superior à média e 2010 inferior à média da região). Para o ano de 2011, após a

aplicação do tratamento de desmatamento e enleiramento do material vegetal no sentido perpendicular ao fluxo com cultivo de milho, a relação de escala para o escoamento foi reduzida em 43% em relação a 2009, mesmo 2011 tendo apresentado a maior pluviometria e erosividade. As leiras formadas ao longo da microbacia tornam-se barreiras ao escoamento, reduzindo a energia e favorecendo a infiltração, criando muitos pontos de sumidouros de escoamento, o que é de difícil representação na escala de 20 m<sup>2</sup> (valores de escoamento podem ser vistos na Figura 23).

Quanto às relações entre escalas para as perdas de solo (Figura 47), na maioria dos casos foi ligeiramente inferior a 1 (microbacia / parcela de 20 m<sup>2</sup>), significando que as perdas de solo foram superiores nas parcelas de 20 m<sup>2</sup> comparadas com as perdas em microbacias. Entretanto, essa afirmativa não foi verificada na área B1/CN e na área B4 no primeiro e segundo ano após o tratamento de desmatamento e queima e cultivo de pastagem. Medeiros (2009) em região semiárida, afirma que com o aumento das vertentes aumenta a possibilidade de infiltração do escoamento gerado a montante, aumentando também a probabilidade de deposição dos sedimentos por diminuição do fluxo de transporte. Além disso, o comprimento de rampa tem uma relação direta com a formação de sulcos, canais e voçorocas (canais com maior profundidade e largura) e, portanto, com a erosão.

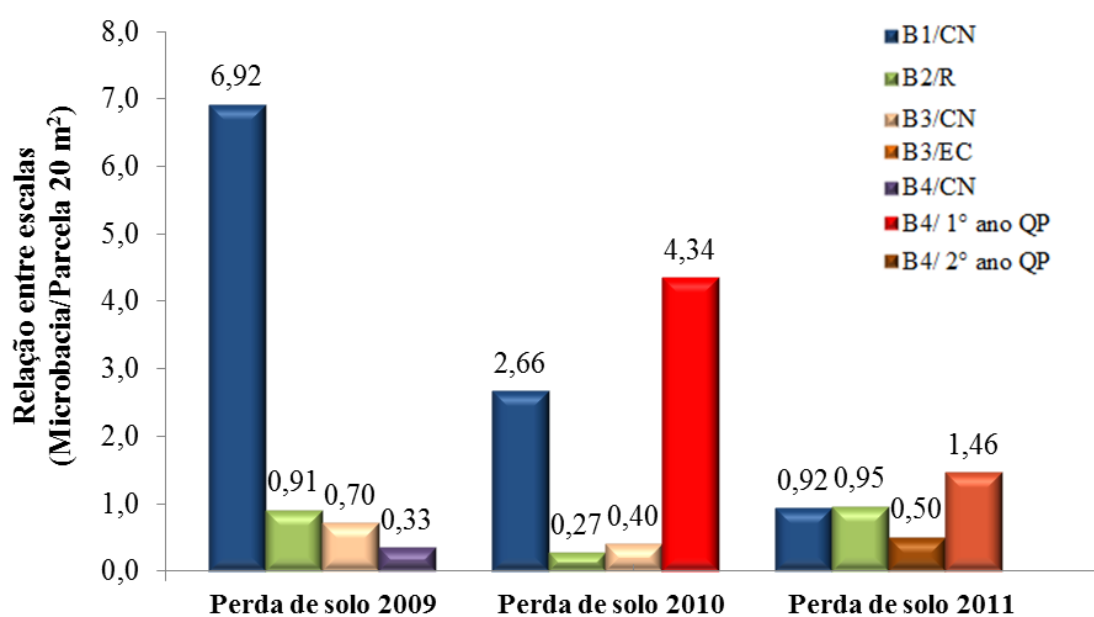


Figura 47 – Razão entre escalas espaciais para a perda de solo, entre as microbacias / parcelas de 20 m<sup>2</sup>, para o período estudado, na estação experimental de Iguatu-CE.

Para a área B1, embora uma área de vegetação nativa, a maior produção de sedimento na escala de microbacia em relação à escala de parcela pode ser justificada pela existência de pontos de alta produção de sedimentos (Figura 28a), com a presença de pequenas áreas de solo descoberto e com alta erodibilidade e susceptibilidade de erosão, o que é comprovada pela formação de pedestais nas rochas (Figura 28b) (característica da erosão hídrica) e a erosão em curso (Figura 28c). Estes resultados confirmam os observados por Rodrigues (2009). Outro ponto que reforça os presentes resultados é a maior densidade da cobertura vegetal na parcela (Figura 28d), o que pode não representar a heterogeneidade de cobertura da microbacia, fato característico da vegetação de Caatinga. Essa heterogeneidade da Caatinga acredita-se que é influenciada pelo comportamento e dinâmica da produção de sedimentos dessas regiões semiáridas, marcado pela formação de áreas produtoras de água, sedimentos e nutrientes, e áreas receptoras desses elementos (zonas de deposição, onde há o melhor desenvolvimento da vegetação, responsáveis pela manutenção da biodiversidade em períodos de escassez hídrica).

A área B2 raleada, embora tenha apresentado as menores relações para o escoamento (Microbacia/Parcela de  $20 \text{ m}^2$ ), para as perdas de solo as relações foram próximas de 1 com valores de 0,91 e 0,95 para 2009 e 2011, respectivamente, contra 0,27 para 2010 (Figura 47). Dessa forma, para os dois anos com precipitação superior à média (2009 e 2011) as relações foram mais próximas de 1, devido aos efeitos da deposição dos sedimentos ao longo da bacia ser compensada pelas erosões pontuais ocasionadas pelas precipitações de elevado poder erosivo. Já no ano de 2010, com precipitação abaixo da média da região e com a ocorrência de chuvas com maior intervalo temporal, ocorreram na escala de microbacia menores alturas da lâmina de escoamento com menor energia para transporte e maior deposição de sedimentos, resultando assim em redução da relação.

Para os anos de 2009 e 2011, que apresentaram precipitações semelhantes sendo essas acima da média da região, a área B3 antes e após o manejo (desmatamento/enleiramento/cultivo de milho) apresenta razões entre escalas para as perdas de solo de 0,70 e 0,50, respectivamente. Dessa forma, a relação entre escala reduziu em 29% após o manejo (2011) em relação ao período com Caatinga nativa (2009), sendo esse resultado relacionado à quebra da energia de fluxo pelas leiras,

resultando em maior deposição de sedimentos na escala de microbacia, reduzindo assim o fator de relação.

Na área B4, a aplicação do tratamento de desmatamento, queimada e cultivo de pastagem (QP) no ano de 2010 (Figura 47), implicou na elevação do valor da relação de escala na perda de solo (Microbacias/ parcela 20 m<sup>2</sup>) de 0,33 em 2009 (ano em que a microbacia encontrava-se com Caatinga nativa) para 4,34 e 1,46 no primeiro e segundo ano após tratamento, respectivamente. O efeito do tratamento na Microbacia resultou em elevadas perdas de solo ao longo do curso, sendo observados vários desmoronamentos pontuais nos cursos (Figura 48a e b), com formação de sulcos. Estes resultaram na redefinição da rede de drenagem, com constante redução ao longo do tempo com o desenvolvimento da gramínea (*Andropogon gayanus* Kunt), caracterizando o processo de adaptação da microbacia à nova cobertura vegetal (Figura 48c e d). A elevação da razão de escala superior a 1 após o tratamento, deve-se à não representação na escala de parcela (20 m<sup>2</sup>) dos fatores supracitados atuantes na escala de microbacia. Contudo, observa-se uma redução na razão de escala para o segundo ano após o tratamento de 66% em relação ao primeiro ano (2010), uma vez que a vegetação e as variáveis relacionadas ao solo, alteradas pelo manejo, estão em fase de regeneração e a rede de drenagem em processo de estabilização.

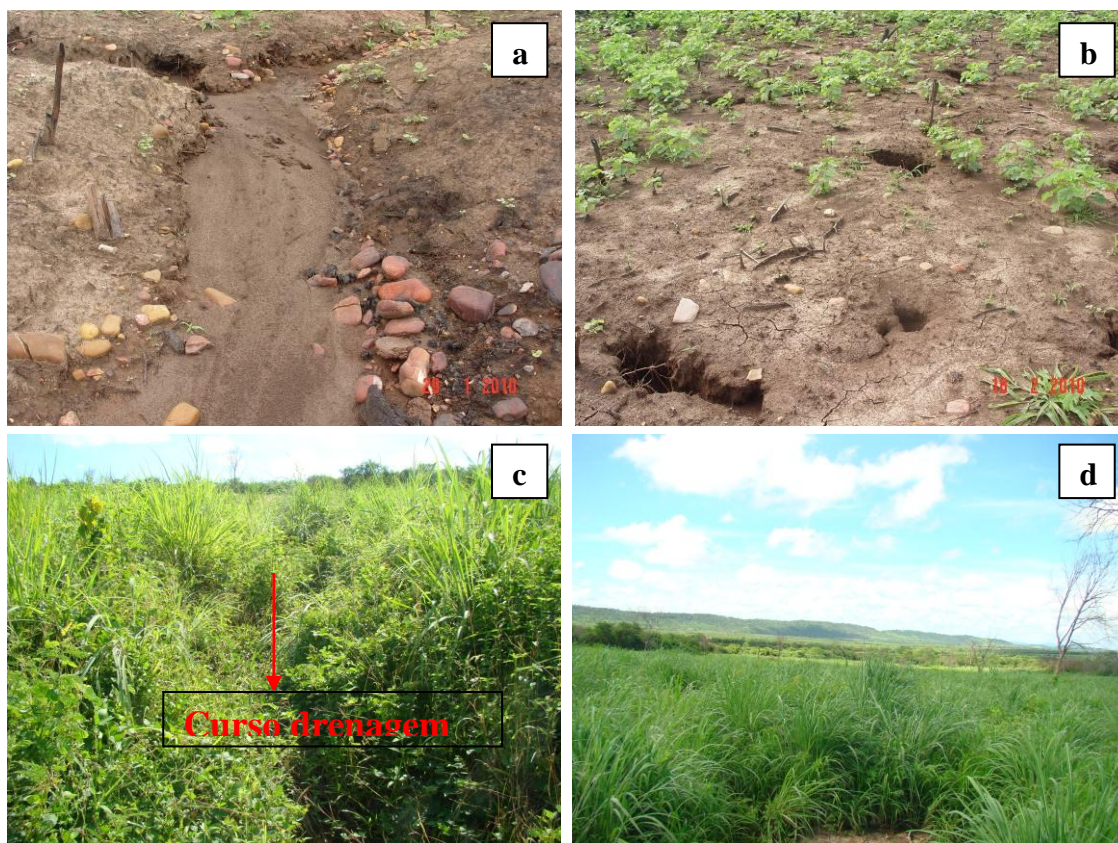


Figura 48 – Microbacia B4, no ano de 2010 após o tratamento, detalhe da alta produção de sedimento no curso (a) e desmoronamentos de solo ao longo dos rachões no solo (b) e em 2011 com a estabilização da rede de drenagem (c) e o desenvolvimento da cobertura vegetal (d).

## 6 CONCLUSÕES

O foco desse trabalho foi o entendimento dos principais processos e fontes de variação nos dados de perda de solo em diferentes escalas espaciais e manejos de uso do solo em região semiárida. Neste sentido, conclui-se que:

- Ocorreram maiores coeficientes de escoamento na escala de 20 m<sup>2</sup> que nas escalas de 1 m<sup>2</sup> e de microbacia: em relação à escala de 1 m<sup>2</sup>, a parcela de 20 m<sup>2</sup> gerou o acúmulo de escoamento ao longo da encosta no sentido de jusante; e a escala de microbacia apresentou uma maior probabilidade de reinfiltração do escoamento gerado a montante;
- Maiores perdas de solo ocorreram na escala de 20 m<sup>2</sup> que nas escalas de 1 m<sup>2</sup> e de microbacia: em relação à escala de 1 m<sup>2</sup>, a parcela de 20 m<sup>2</sup> provoca um aumento da velocidade de escoamento ao longo da vertente, aumentando também a capacidade de transporte; na escala de microbacia, a presença de áreas com baixas declividades atuaram como zonas receptoras de sedimentos;
- Os resultados obtidos indicam que a transferência de dados de perdas de solo mensurados em pequenas parcelas para maiores escalas não pode ser feita de maneira linear, devendo ser considerada toda a heterogeneidade de bacias hidrográficas, dificilmente representada na pequena escala;
- Para a área B1 com Caatinga Nativa, a presença de pontos de alta erodibilidade e com solo nu, na escala de microbacia, é responsável pela maior parte das perdas de solo, fato que não pode ser representado na pequena escala de parcela;
- As amplitudes dos valores de Descarga Específica de Sedimento (DES), para a área B1 Caatinga Nativa, decresceram com a redução da área de captação. A maior amplitude para a escala de microbacia deve-se aos processos de conectividade sedimentológica, que é caracterizada como a transferência de sedimento de um local para outro, podendo esse ser depositado ao longo da bacia em um dado evento e facilmente transportado por um seguinte. Tal processo gera na bacia zonas produtoras e receptoras de sedimentos, aumentando ou reduzindo o DES ao longo dos eventos de chuva;

- A aplicação do tratamento de desmatamento, queimada e cultivo de pastagem (*Andropogon gayanus* Kunt), área B4, implicou na elevação do valor da relação de escala na perda específica de solo (Microbacias/ parcela 20 m<sup>2</sup>) em relação ao ano com Caatinga Nativa. O efeito do tratamento na escala de microbacia resultou em elevadas perdas de solo ao longo do curso, com formação de sulcos, fato não representado na escala de parcela. Ocorreu redução na relação de escala após o segundo ano do tratamento, resultando da redefinição da rede de drenagem com o desenvolvimento da gramínea caracterizando assim, o processo de adaptação da microbacia à nova cobertura vegetal;
- A área B2, que recebeu o tratamento de raleamento, apresentou na escala de microbacia menor coeficiente de escoamento superficial e menores perdas específicas de solo em relação à área B1 (Caatinga nativa). Esses resultados justificam-se pelo grande desenvolvimento da cobertura vegetal herbácea, que cobriu praticamente toda a superfície do solo. Dessa forma, o extrato herbáceo mais desenvolvido na área B2, atenua o escoamento, com a redução do impacto direto das gotas da chuva no solo e maior resistência ao fluxo de água;
- Na área B3, após o manejo de desmatamento e enleiramento dos restos vegetais e cultivo de milho (EC) em 2011, observa-se incremento no coeficiente de escoamento superficial e nas perdas de solo em relação ao período anterior com cobertura de Caatinga nativa;
- O tratamento de desmatamento, queimada e cultivo de pastagem (*Andropogon gayanus* Kunt), área B4, resultou nas maiores perdas de solo e água em relação aos demais manejos estudados.
- As perdas de solo para todos os manejos estudados ficaram abaixo dos limites toleráveis propostos pela FAO, que é de 2 a 4 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para solos rasos ou impermeáveis. Porém, deve-se ter cuidado com esses limites uma vez que foram desenvolvidos em outras regiões.



## REFERÊNCIAS

AGRITEMPO - Sistema de monitoramento agrometeorológico. Dados meteorológicos - Iguatu (INMET), dados históricos. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agroclima/sumario>>. Acesso em: 16 maio 2011.

AGUIAR, M. I.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAUJO FILHO, J. A. Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 03, p.270-278, 2006.

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, J. R. Manejo da cobertura do solo e de práticas conservacionistas nas perdas de solo e água em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.136-141, 2002.

ALVES, N. N. L. **Caracterização de micro-bacia hidrográfica experimental no semiárido brasileiro como suporte a estudos da degradação**. 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 1998. 1220 p.

ARNAU-ROSALÉN, E.; CALVO CASES, A.; BOIX-FAYOS, C.; LAVÉE, H.; SARAH, P. Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation. An example of methods applied to Mediterranean hillslopes (Alicante, Spain). **Geomorphology**, v. 101, n. 4, p.595-606, 2008.

BAGARELLO, V.; FERRO, V. Plot-scale measurement of soil erosion at the experimental area of Sparacia (southern Italy). **Hydrological Processes**, v. 18, p. 141–157, 2004.

BAKKER, M. M.; GOVERS, G.; KOSMAS, C.; VANACKER, V.; VAN OOST, K.; ROUNSEVELL, M. Soil erosion as a driver of land-use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 105, p. 467–481, 2005.

BAKKER, M. M.; GOVERS, G.; ROUNSEVELL, M. D. A. The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. **Catena**, v. 57, p. 55–76, 2004.

BARTON, A.P.; FULLEN, M.A.; MITCHELL, D.J.; HOCKING, T.J.; LIU, L.; BO, Z. W.; ZHENG, Y.; XIA, Z. Y. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, p. 343–357, 2004.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006, 625 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 3. ed. São Paulo, Ícone, 1993. 355 p.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; CALVO-CASES, A., CASTILLO, V., ALBALADEJO, J. Concise review of interrill erosion studies in SE Spain (Alicante and Murcia). Erosion rates and progress of knowledge in the last two decades. **Land Degradation and Development**, v. 16, p. 517–528, 2005.

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; CALVO-CASES, A.; ARNAU-ROSALÉN, E.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 85–101, 2007.

CALVO-CASES, A.; BOIX-FAYOS, C.; IMESON, A. C. Runoff generation, sediment movement and soil water behaviour on calcareous limestone slopes of some Mediterranean environments in southeast Spain. **Geomorphology**, v. 50, p. 269–291, 2003.

CAMMERAAT, E.L.H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in Southeast Spain. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, p. 317–332, 2004.

CAMMERAAT, L.H. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p.1201–1222, 2002.

CANTÓN, Y.; DOMINGO, F.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. **Journal of Hydrology**, v. 252, p. 65-84. 2001.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; CRUZ, E. S.; CEDDIA, M. B.; LANA, A. M. Q. Perda de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2002.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2008. 326 p.

CAVICHIOLO, S. R. **Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica em diferentes métodos de preparo do solo em plantio de *Pinus taeda***. 152 f. 2005. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CERDÀ, A.; MORERA, A.G.; BODI, M.B. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 13, p. 1822-1830, 2009.

CERDAN, O.; GOVERS, G.; BISSONNAIS, Y. LE; VAN OOST, K.; POESEN, J.; SABY, N.; GOBIN, A.; VACCA, A.; QUINTON, J.; AUERSWALD, K.; KLIK, A.; KWAAD, F.J.P.M.; RACLOT, D.; IONITA, I.; REJMAN, J.; ROUSSEVA, S.; MUXART, T.; ROXO, M.J.; DOSTAL T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. **Geomorphology**, v. 122, p. 167-177, 2010.

CHAPLOT, V.; LE BISSONNAIS, Y. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, p. 145–153, 2000.

DE VENITE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale. Scale issues and semiquantitative models. **Earth-Science Reviews**, v. 71, p. 95–125, 2005.

DESIR, G.; MARÍN, C. Factors controlling the erosion rates in a semi-arid zone (Bardenas Reales, NE Spain). **Catena**, v. 71, p. 31–40, 2007.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisas de Solo. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro. 2 ed., 2006, 306 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **La erosión del suelo por El agua**: algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Roma, 1967. 207p.

FERNÁNDEZ, C.; VEGA, J. A.; GRAS, J. M. FONTURBEL, T.; CUIÑAS, P.; DAMBRINE, E.; ALONSO, M. Soil erosion after *Eucalyptus globulus* clearcutting:

differences between logging slash disposal treatments. **Forest Ecology and Management**, v. 195, p. 85–95, 2004.

FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. 84 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2011.

FITZJOHN, C.; TERNAN, J.L.; WILLIAMS, A.G.; PÉREZ GONZÁLEZ, A.; DE ALBA, S. Dealing with soil variability: some insights from land degradation research in central Spain. **Land Degradation and Development**, v. 13, p. 141–150, 2002.

FOSTER, G. R.; MCCOOL, D. K.; RENATO, K. G.; MOLDENHAUER, W. C. Conservation of the Universal Soil Loss Equation the SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 36, p. 355-359, 1981.

FRANCO, F. S.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F.; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J. A. A. Quantificação de erosão em Sistemas Agroflorestais e Convencionais na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 26, n. 06, p. 751-760, 2002.

FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. J.; PRETON, N. J.; KASAI, M. Buffers, barriers and blankets: the (dis) connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, v. 70, p. 49-68, 2007.

GAFUR, A.; JENSEN, J. R.; BORGGAARD, O. K.; Petersen, L. Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation (Jhum) in the Chittagong Hill Tracts of Bangladesh. **Journal of Hydrology**, v. 274, p. 30–46, 2003.

INÁCIO, E. S. B.; CANTALICE, J. R. B.; NACIF, P. G. S.; ARAUJO, Q. R.; BARRETO, A. C. Quantificação da erosão em pastagem com diferentes declives na microbacia do Ribeirão Salomea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 355–360, 2007.

LE BISSONNAIS, Y.; BENKHADRA, H.; CHAPLOT, V.; FOX, D.; KING, D.; DAROUSSIN, J. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m<sup>2</sup> to small catchments. **Soil and Tillage Research**, v. 46, n. 69–80, 1998.

LEYS, A.; GOVERS, G.; GILLIJNS, K.; POESEN, J. Conservation tillage on loamy soils: explaining the variability in interrill runoff and erosion reduction. **European Journal of Soil Science**, v. 58, n.6, p. 1425–1436, 2007.

LOPES, J. F. B. **Deposição e decomposição de serapilheira em área da caatinga cearense**. 43p. 2008. Monografia (Curso de Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MARTÍNEZ-MENA, M.; CASTILLO, V.; ALBALADEJO, J. Hydrological and erosional response to natural rainfall in a degraded semiarid area of South-East Spain. **Hydrological Processes**, v. 15, p. 557-571, 2001.

MARTÍNEZ-MENA, M.; LOPEZ, J.; ALMAGRO, M.; BOIX-FAYOS, C.; ALBALADEJO, J. Effect of water erosion and cultivation on the soil carbon stock in a semiarid area of South-East Spain. **Soil & Tillage Research**, v. 99, p. 119–129, 2008.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 27, p. 395-403. 2003.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 82 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2009.

MEDEIROS, P. H. A.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G.L.; ARAÚJO, J.C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n.4, p. 636-648, 2010.

OLLESCH, G.; VACCA, A. Influence of time on measurement results of erosion plot studies. **Soil and Tillage Research**, v. 67, p. 23–39, 2002.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91–133, 2003.

PUIGDEFÁBREGAS, J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, p. 133–147, 2005.

RENSCHLER, C. S.; HARBOR, J. Soil erosion assessment tools from point to regional scales the role of geomorphologists in land management research and implementation. **Geomorphology**, v. 47, p. 189–209, 2002.

RODRIGUES, J. O. **O uso da terra e resposta hidrossedimentológica em pequenas bacias hidrográficas semiáridas**. 128 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2009.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba. **Revista OKARA: Geografia em Debate**, v. 1, n. 1, p. 16-32, 2007.

SANTOS, J. C. N.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; ARAÚJO NETO, J. R. Runoff and soil and nutrient losses in semiarid uncultivated fields. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 3, p. 813-820, 2011.

SCHÄFER, M. J.; REICHERT, J. M.; CASSOL, E. A.; ELTZ F. L. F.; REINERT, D. J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 419-430, 2001.

THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff and soil loss. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 130, p. 23–30, 2009.

VAN WESEMAEL, B.; RAMBAUD, X.; POESEN, J.; MULIGAN, M.; CAMMERAAT, E.; STEVENS, A. Spatial patterns of land degradation and their impacts on the water balance of rainfed treecrops: A case study in South East Spain. **Geoderma**, v. 133, p. 43–56, 2006.

VERHEIJEN, F. G. A.; JONES, R. J. A.; RICKSON, R. J.; SMITH, C. J. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth-Science Reviews**, v. 94, p. 23-38, 2009.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p. **Agriculture Handbook**, 537.