

6 Conclusões

Objetivando contribuir para o desenvolvimento de técnicas de monitoramento de parâmetros hidrossedimentológicos no sistema solo-planta-atmosfera, nesta tese procurou-se estabelecer uma articulação entre as dimensões de campo, laboratório e modelos conceituais e analíticos de interpretação.

Tal articulação foi possível mediante a utilização de uma combinação de metodologias capaz de dar conta destas relações sem que, em termos operacionais, nenhum dos campos de interpretação apresentasse limitações irredutíveis em relação aos demais. Neste sentido, foram combinadas e aplicadas, ao campo experimental geotécnico, técnicas originárias de outros campos disciplinares, envolvendo aspectos como a caracterização da vegetação, técnicas de bioengenharia de solos e parâmetros meteorológicos de superfície.

Eventuais insuficiências ou falhas pontuais instrumentais em relação ao monitoramento de parâmetros envolvidos foram circunstanciais e não minimizaram a importância e a viabilidade da dimensão em que se desenvolveu a pesquisa. A principal contribuição da investigação não foi um aprofundamento teórico e prático isolado dos próprios parâmetros, mas uma forma inovadora de entrecruzamento dos mesmos.

6.1. Processos de RAD e Construção do Talude e das Parcelas

Sobre os processos de RAD na Área Z, os resultados obtidos até o momento mostraram que as práticas aplicadas foram eficazes na contenção dos processos erosivos, mediante a regularização e aumento da rugosidade da superfície do terreno, bem como através do ordenamento do escoamento da enxurrada pelos terraços.

A vegetação arbustiva e arbórea, bem como o capim Vetiver, tem apresentado crescimento adequado, favorecido pela boa intensidade e distribuição das chuvas no decorrer do período de monitoramento. Estes resultados são semelhantes aos alcançados por Andrade *et al.* (2005) no Morro do Radar, entre

os anos 2000 a 2003. Devido ao encerramento da primeira etapa do projeto os trabalhos de RAD foram interrompidos logo no início do processo de revegetação no verão de 2008.

Sobre o projeto de RAD no todo, somente em alguns pontos ocorreram problemas isolados nos processos de recuperação, por remobilização do solo através de práticas mecânicas sem posterior revegetação, o que piorou tendo em vista as fortes chuvas ocorridas. Estes pontos necessitam de atenção, uma vez que práticas mecânicas foram implantadas deixando o solo desagregado e sujeito à atuação dos agentes erosivos.

As bacias de acumulação apresentaram taxas elevadas de sedimentação, o que mostra a intensidade dos processos erosivos, a magnitude do escoamento superficial e a reduzida capacidade de infiltração. Nos eventos em que foram registrados processos de escoamento nas parcelas de erosão puderam ser visualizados processos de maior magnitude nas entradas nas bacias e no corpo dos terraços, pois a área de captação de escoamento destas estruturas é muito maior.

A forma das bacias facilita a implantação de um tipo de monitoramento semelhante ao realizado nas parcelas, com a instalação das calhas para medição automatizada da erosão. As calhas medirão maiores volumes, ilustrando a área de captação dos terraços, que pode ser monitorada permanentemente de várias maneiras, inclusive através de taxas de recobrimento com imagens de satélite e utilização do software *SIARCS* com fotos de pontos estratégicos como no topo do morro, de forma semelhante ao realizado nesta tese para o talude.

Outro aspecto que chama a atenção em relação ao entorno do talude foi o possível estabelecimento de relações comparativas entre espécies vegetais implantadas, pois foram conformados outros taludes, com a mesma inclinação visando estas comparações. Informações como taxas de crescimento e desenvolvimento, índices de área foliar, sistemas radiculares e perfis de condutância estomática, podem subsidiar através dos parâmetros relacionados à formulação geral de Penman-Monteith, a interpretação e modelagem dos dados.

6.2. Caracterização do Perfil Estratigráfico

Visando gerar uma fundamentação geológica para a divisão das camadas sob o ponto de vista geotécnico, o perfil foi avaliado mediante uma correlação

com os depósitos descritos por Ferrari (2001) em áreas próximas. Conforme mencionado, os depósitos da Formação Macacu presentes na Área Z se assemelham muito aos da Associação de Fácies C descritos por Ferrari (*op. cit.*, 2001), de canal fluvial entrelaçado, com afogamentos episódicos de deposição de sedimentos. Nas pesquisas de Ferrari (*op. cit.*), em um raio de 1 km da Área Z, foram observados em três pontos de avaliação estes materiais, próximos ao muro de divisa da área patrimonial do aeroporto.

A identificação de um padrão bastante similar ao encontrado por Ferrari (2001) para os sedimentos da Formação Macacu em regiões vizinhas facilitou ainda a identificação das diferentes camadas que compõem o perfil estratigráfico sob o ponto de vista geotécnico, sendo que a concepção da assinatura tectônica e das fácies sedimentares se mostrou uma excelente ferramenta para a geração do modelo tridimensional.

A avaliação morfológica do perfil segundo critérios pedológicos também se mostrou uma ferramenta complementar para a determinação das transições de camadas sob o ponto de vista geotécnico, fornecendo um maior detalhamento em termos de transições e propriedades morfológicas, destacando-se a utilização da escala de cores de Munsell.

A identificação e descrição de concreções, matizes e cromas presentes e suas relações a constituição do solo, seus aspectos físicos, químicos e mineralógicos (posteriormente confrontadas com análises laboratoriais), assim como a descrição da macroestrutura sob o ponto de vista morfológico, foram importantes na definição dos limites entre camadas e do modelo 3D.

Sendo assim, a partir das fácies identificadas por Ferrari (*op. cit.*) o perfil foi segmentado em cinco camadas: A - Amarelo (referente à Fácies *Amp* de arenitos finos com grãos de feldspato caulinizado), R - Roxo (referente à Fácies *Llm* de lamitos argilosos e maciços), VE - Vermelho-Escuro (também (referente à Fácies *Llm*), V - Vermelho (referente à Fácies *Aça* de arenitos feldspático com seixo e clastos de lamitos e quartzo), VA - Vermelho-Amarelo (referente à Fácies *Acpb* – arenito feldspático caulínico de granulação média e grossa). A existência no perfil da repetição de um tipo de camada (A1 e A2) foi confirmada após as avaliações laboratoriais, visto que ambos os materiais possuem as mesmas propriedades geotécnicas.

No que diz respeito à classificação geotécnica, as camadas VE e R podem ser classificadas de acordo com o sistema SUCS como argilas de alta atividade (CH) - apesar de ser um material de baixa atividade quimicamente. Morfologicamente (pedologicamente) os materiais possuem estrutura laminar à maciça, consistência extremamente dura, sendo plásticos e ligeiramente pegajosos. As camadas VA, V e A são areias mal graduadas (SP), e apresentam estruturas em blocos angulares/subangulares à maciça, consistência dura, friável, sendo materiais não plásticos a plásticos e ligeiramente pegajosos a pegajosos.

Foram encontradas dificuldades em relação à identificação dos limites e das propriedades na camada VE. A transição irregular e a existência de uma camada de impedimento hidráulico, formada pela canga laterítica no contato com a camada A2 sobrejacente, é um fator que provavelmente influencia nos fluxos e na distribuição da umidade no talude.

Para que seja possível gerar mais informação sobre este assunto seriam necessárias avaliações sobre o comportamento desta transição, isto é, sua permeabilidade. Além disso, o menor valor de permeabilidade encontrado para a camada R em relação à camada VE como um todo deve ser investigado mediante um maior número de ensaios de campo e laboratório, uma vez que os resultados dos ensaios obtidos até o momento não permitem avançar no assunto.

No que diz respeito à caracterização química, tanto as análises de ataque sulfúrico, quanto complexo sortivo e resultados obtidos nas análises semiquantitativas, revelaram uma acentuada tendência das concentrações de Fe_2O_3 e Al_2O_3 na camada VE e, em menor grau, na camada R, além da lixiviação do SiO_2 e bases em todas as camadas caracterizando processo geoquímico de laterização. As camadas VA, V e A apresentaram valores mais elevados de SiO_2 evidenciando possivelmente uma menor alteração intempérica e lixiviação.

Os resultados das descrições da mineralogia das areias indicaram materiais constituídos predominantemente por quartzo hialino (ora milonitizados, ora sub-arredondados, alguns corroídos como nas camadas V e A, ou ainda fragmentos bem angulosos na camada VA), sendo marcante a presença de 15 a 20% de agregados argilo-ferruginosos na camada VE.

Sobre as análises de mineralogia dos argilominerais, observou-se que o material é constituído por caulinita, sendo que somente em uma das camadas (VA), foi detectada uma possível presença de materiais expansivos. Este aspecto

ainda está em vias de confirmação, através de análises de DRX mediante diferentes tratamentos térmicos (350° por 4hs e depois 550° por 4hs na mesma lâmina orientada), o que não pôde ser incluído nesta tese por falta de tempo disponível.

Sobre a investigação dos parâmetros hidráulicos, observou-se que na determinação de K_{sat} os ensaios de campo pelo método do permeâmetro de Guleph foram os que mostraram os melhores resultados. As camadas apresentaram os seguintes valores de K_{sat} : VE – 1.0467 E-5 m/s; R – 6.126 E-6 m/s; V - 5.725 E-4 m/s; VA – 1.141 E-5 m/s; A – 4.897 E-5 m/s. Nos ensaios de carga constante na célula triaxial, os menores valores de K_{sat} em relação aos primeiros se devem provavelmente ao fato de que nos corpos de prova não encontram-se presentes os aspectos da macroestrutura de campo. Como a estrutura laminar na camada VE facilita a percolação o resultado do ensaio de Guelph nesta camada mostrou um valor consideravelmente maior em relação à R.

No que diz respeito às curvas de retenção de umidade, observou-se que as curvas obtidas nos ensaios por porosimetria apareceram um pouco deslocadas para a direita em relação aos pontos experimentais obtidos pelo método do papel filtro. Moncada (2008) encontrou comportamento semelhante estudando solos residuais de filito, e considerou como justificativa provável para tal a necessidade de secamento das amostras de solo em estufa previamente à execução dos ensaios por porosimetria, podendo induzir a uma redução dos tamanhos dos poros (sem, entretanto, alterar a forma e distribuição dos mesmos). Sobre os métodos de ajustes adotados, de uma maneira geral observou-se que os ajustes obtidos pelo modelo de van Genuchten, tanto para os casos de curvas unimodais quanto bimodais, os coeficientes de correlação foram muito baixos, em função da grande dispersão dos resultados experimentais obtidos pelo método do papel filtro.

Sobre as investigações do potencial de erosão dos solos, observa-se que o ensaio de desagregação foi o que apresentou o comportamento mais semelhante ao observado em campo, e os maiores índices de erodibilidade das camadas VE e R em relação às demais foram ilustrados documentando como a erosão em campo ocorre com o recuo das camadas VA, V e A, controlando a desagregação e erosão das camadas VE e R. Nas estimativas do Fator K , as formulações usadas se mostraram adequadas e a tendência de erodibilidade foi igual à identificada nas observações de campo e ensaios de desagregação.

As demais propriedades e índices utilizados (principalmente dispersibilidade e grau de floclulação) na avaliação da erodibilidade dos solos não apresentaram boa correlação com o comportamento hidro-erosivo observado em campo, sendo que estão sendo realizados ensaios de tração (compressão diametral) visando uma melhor investigação sobre ensaios de erosão nestes materiais. Deste modo foi estabelecida a seguinte hierarquia de erodibilidade das camadas em avaliação:

$$VE [k=0.12] = R [k=0.12] > V [k=0.09] = VA [k=0.09] = A [k=0.09]$$

6.3. Parâmetros Meteorológicos de Superfície

No levantamento das condições de umidade antecedente, a série temporal de registros de precipitações locais disponibilizada pela Estação Meteorológica da GEORIO (com registros em mm/15 min e localizada a 2330 metros de distância da Área Z sem obstáculos orográficos dentro da Ilha do Governador) se mostrou uma excelente ferramenta para o preenchimento de falhas de monitoramento, comparação e validação de registros locais.

A avaliação dos pluviômetros revelou uma variabilidade muito maior nas leituras dos *ECRN (Decagon)*, correlacionando com registros do pluviômetro *DAVIS* da estação meteorológica e da Estação da GEORIO. Isto ocorreu devido à menor área de captação e também maior volume de balsa do instrumento, que reduzem sua resolução e a precisão proporcionalmente à diferença no tamanho da área de captação entre os instrumentos. Resultados similares foram obtidos em ensaios efetuados pelo fabricante do *ECRN (Decagon, 2006)*. As correlações entre os registros dos pluviômetros *ECRN* e o *DAVIS* foram muito baixas ($R^2 = 0.52$), sendo a correlação da estação da GEORIO com a estação meteorológica consideravelmente superior ($R^2 = 0.72$).

Sobre o comportamento da precipitação local em relação às condições antecedentes e no período de monitoramento, observa-se que este último foi marcado por uma excelente distribuição de chuvas, sem a existência de secas fortes, o que ocorreu somente em maio de 2009. Isto facilitou o desenvolvimento desta pesquisa, possibilitando o registro de vários eventos de escoamento superficial e erosão, além viabilizar o desenvolvimento da vegetação.

Neste último aspecto, o mais importante não foi o desempenho da vegetação em si, mas a possibilidade de monitorar seus efeitos hidrológicos e o controle da

erosão em diferentes estágios de desenvolvimento, dentro de uma perspectiva de monitoramento de campo que abranja a maior quantidade de parâmetros relacionados. Graças ao crescimento pronunciado da vegetação nas parcelas I e IV, uma contribuição gerada foi o monitoramento da interceptação pelas copas através da utilização dos pluviômetros *ECRN* associado à avaliação das precipitações antecedentes, velocidades e direções de ventos, que confirmaram uma estreita relação com o comportamento dos fenômenos de atravessamento e gotejamento.

Estas constatações foram obtidas com a interpretação de registros de precipitações de intensidades semelhantes dentro do período de avaliação, onde as condições anteriores de umidade, a direção e velocidade dos ventos variaram. Observa-se que na área predominaram ventos SW, NE e SE, sendo que foi constatado que os ventos frontais e semi-frontais em relação ao talude, de direção predominante SW e SE, foram responsáveis pelo maior atravessamento. A velocidade dos ventos nestes períodos variou proporcionalmente à intensidade das chuvas, e por isso a influência deste parâmetro não foi avaliada.

Assunção *et al.* (2006) apresentaram uma técnica para estimar a energia cinética de impacto das gotas sobre a superfície do solo em função da inclinação média das chuvas e da velocidade média do vento. Para isto foram utilizados dados horários da pluviometria e da velocidade média do vento e dados pluviométricos diários medidos com pluviômetros vetoriais. Os resultados mostraram que há uma correlação positiva entre inclinação média das chuvas e a velocidade média do vento, sendo que foi detectado que a inclinação média mensal das chuvas e os impactos cinéticos provocados pelo regime pluviométrico diminuem à medida que o plano da declividade do terreno aumenta em relação à inclinação das chuvas.

No que diz respeito ao entrecruzamento entre os parâmetros meteorológicos em superfície e monitoramentos do escoamento superficial e perfis de sucção e umidade, a divisão das chuvas em classes se mostrou uma ferramenta conveniente possibilitando a distinção de eventos similares sob condições de umidade antecedente e desenvolvimento vegetal distintos, facilitando a interpretação dos resultados dos efeitos das técnicas de bioengenharia no controle da erosão.

6.4. Caracterização da Vegetação

Os resultados da caracterização da vegetação tiveram como principal propósito subsidiar a avaliação dos parâmetros hidrossedimentológicos em relação ao controle de erosão, escoamento superficial, demanda hídrica, recarga freática e economia de água. No decorrer de pesquisas sobre balanços hídricos das espécies em estudo, observou-se que seja para fins geotécnicos ou sob o ponto de vista agrícola, aplicações de técnicas de bioengenharia ainda não foram avaliadas e atualmente os valores de K_c são tabelados somente em relação a tipos vegetação isolados existentes nestes consórcios (Doorembos & Pruitt, 1977). Soma-se a isso a questão da relação entre o consórcio em si e a taxa de recobrimento dando maior complexidade à análise em questão.

Sobre o crescimento das plantas nas parcelas:

Indivíduos de todas as espécies apresentaram maior crescimento em altura no terço inferior, e no caso do sabiá, o maior indivíduo [n°55] atingiu 4.7m; a *Acacia auriculiformis* se desenvolveu mais em relação ao DAP, com indivíduos apresentando até 14cm [n°33] no terço superior; o sabiá apresentou valores consideravelmente superiores de DAB em relação às demais espécies, chegando à 35cm [n°42].

Os valores indicaram um bom desenvolvimento dos indivíduos em produção de biomassa aérea. A *Acacia auriculiformis* produziu uma maior quantidade de biomassa aérea (9.5kg), mesmo possuindo aproximadamente o mesmo tamanho. Já o crescimento do sabiá se mostrou mais acentuado nas raízes conforme será visto adiante, atingindo um comprimento de 0.80 a 1.25m, e uma profundidade em torno de 0.35m, constituindo, de acordo com as avaliações, a parcela onde os sistemas radiculares de longe obtiveram maior aprofundamento.

Tal comportamento foi também encontrado por Andrade (1997) analisando sistemas radiculares de indivíduos desta mesma espécie em áreas submetidas a processos de RAD no interior fluminense. Os resultados mostraram que a *Acacia auriculiformis* apresentou uma maior taxa de área radicular em relação ao sabiá, além de um comprimento uma ordem de grandeza superior. Apesar destes resultados, os sistemas do sabiá apresentaram uma maior distribuição no terreno, lateralmente, com raízes mais resistentes, o que implica em um efeito mais benéfico em relação ao controle da erosão e à estabilidade.

O crescimento da vegetação na Parcela III foi menor em relação às demais, sendo mais pronunciado no terço inferior, e quase não havendo pegamento na parte superior do talude. A Crotalária atingiu uma altura máxima em torno de 0.5m no terço inferior e superior, enquanto o nabo forrageiro chegou a 0.75m no terço inferior, devido à sua morfologia mais alongada. A brachiária apresentou um bom desenvolvimento, entretanto como é uma espécie rasteira, seu crescimento em altura não é pronunciado. As produções totais de biomassa foram de 2 kg para uma área de coleta de 400cm². Apesar disso, a brachiária, devido ao sistema radicular fasciculado e abundante, se desenvolveu muito bem apresentando uma excelente penetração na camada VE. No que diz respeito ao desenvolvimento do nabo forrageiro, apesar de não ter tido crescimento pronunciado em altura, se estendeu bastante lateralmente, chegando a 0.50m e formando um sistema superficial.

Para caracterização do crescimento da vegetação na Parcela IV foi também importante a avaliação de aspectos como a facilidade de atravessar a biomanta das diferentes espécies. O crescimento do Guandu foi acentuado, apresentando maior facilidade de atravessamento da biomanta e tempo de emergência menor em todas as partes da parcela, independente do terço, o que indica que esta espécie não sofreu limitação no que diz respeito ao seu crescimento.

Após os estágios iniciais de recobrimento, o guandu começou a dominar o talhão e a crotalária e o nabo forrageiro foram dando lugar a este. Observa-se que a brachiária continuou a se desenvolver em estratos inferiores, mesmo após o recobrimento total e a formação de estrato arbustivo pelo guandu. O crescimento da brachiária, entretanto, acentuou-se após o maior desenvolvimento do guandu, com a formação do ambiente de subcopas onde sobrou mais espaço para seu desenvolvimento.

Sobre as estimativas de ET_m : Os resultados destas avaliações mostram que a correlação existente entre os resultados obtidos através das duas formulações [Penman-Monteith original e método da FAO-PM] foi muito boa ($R^2 = 0.984$), mostrando a adequação da proposta metodológica explicitada nesta tese para avaliação de taxas de ET_m para as diferentes parcelas em estudo.

Os valores de ET_m referentes à Parcela II foram maiores em relação às demais, e estes valores são taxas de evaporação ou demanda evaporativa do solo,

sendo que sua determinação passa por um conjunto de formulações diferentes (FAO, 1998). Nesta tese para estimar estas taxas de ET_m para a Parcela II foi adaptada uma metodologia onde foram simplesmente desconsiderados os termos da formulação geral referentes à transpiração e à resistência superficial e aerodinâmica da vegetação. Os resultados das avaliações de K_c foram maiores utilizando-se esta metodologia para a Parcela II (controle), e um coeficiente maior na Parcela I em relação aos demais tratamentos. A Parcela III passou por momentos de maior demanda evapotranspirativa em momentos em que na Parcela I não estava ocorrendo o mesmo comportamento, como no mês de março, na época das maiores chuvas. Isto pode ter ocorrido devido à calibração dos valores de IAF, em função de taxas de recobrimento, altura das plantas como um todo, ou diferenças sob o ponto de vista fisiológico como no que diz respeito ao perfil de condutância estomática.

No que diz respeito à Parcela IV, esta apresentou um K_c mais baixo que as demais na maior parte do período de monitoramento, exceto logo no início em setembro de 2008, quando foram estimados valores mais elevados na Parcela III.

6.5. Escoamento Superficial e Erosão

As parcelas de controle de erosão foram consideradas ponto de partida de todas as demais avaliações, controlando aspectos como o tipo de instrumentação viável, espaçamento entre sondas, espécies vegetais, espaçamento entre mudas e especificações em bioengenharia de solos.

No que diz respeito ao controle da erosão, foi observada uma diferença, já esperada, bastante clara entre os tratamentos avaliados, uma vez que estes mesmos foram aplicados objetivando análises de contrastes, em termos hidrossedimentológicos, entre as técnicas. No período de monitoramento completo foi erodido um total de 377.22 ton/ha na Parcela II; 174.9 ton/ha na Parcela I; 252.95 ton/ha na Parcela III; e 150.45 ton/ha na Parcela IV. Deste modo, o controle de erosão foi maior na Parcela IV (60.11%), seguido da Parcela I (53.63%) e da Parcela III (32.94%).

No que diz respeito ao escoamento, as reduções foram de 73.6% na Parcela IV; 31.7% na Parcela I e 7.8% na Parcela III em relação à Parcela de controle, observando-se que ambos os resultados de reduções de erosão são análises

comparativas e, portanto, limitam-se à representatividade da Parcela II como condições sem recobrimento para as demais. Destaca-se o fato de que no primeiro período de monitoramento foi possível o registro de eventos com todas as parcelas descobertas, sendo determinada a erosão referente a este, de 88.81 ton/ha na Parcela I; 125.08ton/ha na Parcela II, 113.5 ton/ha na Parcela III e 107 ton/ha na Parcela IV.

Observa-se que estes valores, referentes ao período logo após a conformação do talude, na primavera de 2007, mostram que boa parte da erosão no talude ocorreu logo após a construção, possivelmente devido à existência de material não consolidado disponível para remobilização na sua face, por causa das ranhuras propiciadas pela pá da escavadeira hidráulica. A análise da erosão segundo períodos sazonais e mensais se mostrou também uma excelente ferramenta, uma vez que possibilitou estes tipos de deduções, além da visualização das relações entre as taxas de recobrimento estimadas e a diminuição das perdas de solo.

Observou-se uma erodibilidade um pouco diferente nas parcelas, sendo que os resultados apresentaram uma boa correlação com as avaliações sobre o potencial de erosão dos solos, efetuadas através dos ensaios de desagregação, e também em relação aos valores de K , propostos com base nas percentagens das diferentes camadas expostas nas parcelas [I = 0.1200; II = 0.1212; III = 0.1200; IV = 0.1188]. Assim têm-se a seguinte hierarquia de erodibilidade das parcelas:

$$\text{Parcela II} > \text{Parcela I} = \text{Parcela III} > \text{Parcela IV}$$

Independente da menor erodibilidade da Parcela IV em relação as demais, pode-se dizer que a redução da erosão foi muito mais pronunciada nesta parcela, não devendo ser atribuída a estas diferenças, mas sim ao manejo.

Na Parcela III, onde foi aplicada hidrossemeadura, foi constatado desempenho similar ao observado em muitos taludes encontrados no Estado do Rio de Janeiro, conforme ilustrado no decorrer da tese, o que ocorreu porque a má fixação da massa de insumos e sementes jateada provocou seu escorrimento e concentração no terço inferior, fazendo com que o desenvolvimento da vegetação se limitasse praticamente a este terço. Aliás, se não fossem estas condições, provavelmente seria necessária uma reaplicação da hidrossemeadura na Parcela III para viabilização das avaliações nesta parcela.

Ressalta-se que este tipo de avaliação é de fácil viabilização em estudos de taludes, uma vez que normalmente é possível a aquisição de fotos frontais com grande visibilidade tendo em vista a sua associação em termos construtivos a estradas, estacionamentos e seções de aterro. Uma ferramenta, deste modo, que se mostrou muito interessante para avaliar o controle da erosão nas parcelas, foi o *SIARCS*, e como já mencionado, sua utilização para calibração do Fator *C* da equação *USLE* apresentou um resultado bastante coerente com o comportamento observado em campo.

No que diz respeito à aplicação e validação dos fatores relativos aos parâmetros da *USLE*, tanto dados de taxas de recobrimento, quanto das propriedades dos materiais e a erosividade das chuvas, se mostraram coerentes com o resultado de erosão medido e modelado. Os valores referentes ao fator *P* no entanto foram os causadores dos maiores erros nas interpretações. Este último é justamente o parâmetro utilizado na comercialização das técnicas, na parametrização da proteção contra a erosão de um determinado *mix* de sementes, dose de insumos, modo de aplicação, biomantas etc.

Sobre as biomantas, apesar do reconhecido efeito de proteção eficiente contra a erosão, foi observado que o Fator *P* de 0.05 é desproporcionalmente reduzido, aumentando as discrepâncias existentes nas análises comparativas com resultados de campo. Propõe-se a ampliação deste fator à pelo menos 0.1. No que diz respeito ao recobrimento com grama realizado na Parcela I, observa-se que seus efeitos, isolando-se as demais variáveis, são similares ao descrito por Pereira (1999) para cobertura morta de resíduos vegetais [0.5], sendo que por isso o fator utilizado pôde ser considerado adequado. Deve-se frisar que tanto a equação *USLE*, quanto seus parâmetros e fatores apresentam um caráter extremamente empírico e abstrato, com um modelo conceitual bastante simplificado e que reduz uma série de variáveis, como a possibilidade da concentração do escoamento em sulcos, formação de feições erosivas como voçorocas e suas conseqüências.

Como o objetivo desta tese não foi nem validar esta equação, nem especificamente determinar os fatores *C* e *P* referentes aos tratamentos avaliados (para o que seria necessário um experimento envolvendo uma maior repetibilidade dos tratamentos para validação estatística de resultados), limitações referentes à parametrização das técnicas foram apenas visitadas numa forma de subsidiar

avaliações futuras, fundamentando comparações com o monitoramento automatizado do escoamento superficial e da erosão.

No que diz respeito ao monitoramento automatizado da erosão superficial, cujo desenvolvimento de instrumentação foi importante questão no contexto desta pesquisa, observa-se que a instrumentação desenvolvida se mostrou adequada, necessitando ainda de ajustes. A adaptação de um sistema de vazão em canal aberto se mostrou uma boa alternativa para medição de parcelas de controle de erosão. Tal alternativa, conforme apontado no Capítulo IV, foi também utilizada para pesquisas em situações bastante semelhantes. Um aspecto importante diz respeito ao tipo de vertedor a ser instalado (geometria e material).

A Calha Parshall com 2” de garganta é uma excelente alternativa, uma vez que o intervalo de vazões é bastante compatível com as registros das caixas coletoras. Mais importante, o sistema possui caráter auto-limpante, o que para medição da erosão é crucial.

No que diz respeito ao sistema de monitoramento de níveis nas Calhas, foi constatado que o transmissor de nível LU-20 apresentou uma oscilação muito forte, mesmo dentro dos diferentes intervalos de aquisição de dados estipulados, com uma tendência à diminuição desta com o aumento do tempo entre leitura. Entretanto nos resultados iniciais de monitoramento, obtidos após o desenvolvimento de calibrações em laboratório o R^2 obtido na equação de calibração da vazão para o *logger AHLBORN* foi de 0.9949 mostrando um excelente comportamento das sondas.

As avaliações foram realizadas em intervalos de aquisição de dados como os mencionados (20 segundos, 40 segundos, 1 minuto) após a visualização do fenômeno em campo da erosão, durante a instalação dos canais de amenização das calhas. Nestes dias observou-se que o escoamento pode se dar por poucos minutos, ocasionando na ascensão do nível na Calha às vezes por poucos segundos, como foi discutido nos eventos de escoamento interpretados. De fato, durações de eventos de escoamento bastante semelhantes foram encontradas mesmo em avaliações em vertedores com transmissores de nível ultra-sônicos adaptados a áreas muito maiores e para maiores vazões (van den Elsen, 2003; Zhou & Tingwu, 2006).

Não foi detectada a causa da oscilação nos transmissores. Durante a pesquisa foi observado que o princípio de funcionamento dos sensores (ultra-som)

é considerado o mais adequado em relação às medições de fluidos com elevados teores de sólidos suspensos (Caltrans, 2003). Entretanto, algumas limitações já apontadas para este tipo de instrumentação referem-se a possíveis interferências de aspectos como ventos e sua utilização em estruturas de tamanho reduzido.

No que diz respeito ao dimensionamento, observa-se que, tanto o posicionamento dos transmissores, quanto a seleção do tipo de calha, foram efetuados com bastante rigor técnico, restando aspectos das variações climáticas, ou em relação ao comportamento do transmissor. Uma vez que o princípio de funcionamento do sensor, sem contato com o fluido, pareceu ser o ideal neste tipo de avaliação, propõe-se a manutenção dos transmissores, mas com a construção de um pequeno abrigo (de telha) em cima das calhas, protegendo-as, assim como a instrumentação, das intempéries. Observa-se que inclusive isto diminuirá a turbulência na lâmina d'água nos eventos de escoamento.

Posteriormente, visando um aprimoramento na aquisição dos dados, e a minimização de possíveis oscilações causadas por problemas de interface de *hardware*, associada à necessidade de implantação de um sistema de medições da concentração dos sedimentos nas enxurradas através dos turbidímetros, foi desenvolvido um sistema adaptado através da utilização de uma estação hidrossedimentológica da marca SOLAR, onde a aquisição dos dados de nível dos LU-20 foi realizada através do acoplamento de um módulo corrente, especificamente desenvolvido no contexto desta tese. Os resultados referentes ao primeiro evento de escoamento monitorado mostraram uma maior estabilidade nas leituras dos LU-20, porém o acoplamento dos turbidímetros ao sistema de escoamento das enxurradas ainda se mostrou um obstáculo.

No que diz respeito às concentrações de sedimentos nas enxurradas, na definição do princípio de medição a ser adotado observou-se que os sensores óticos são uma boa escolha, principalmente pela resolução, facilidade de interface e possibilidade de aquisição de dados em curtos intervalos de tempo. As limitações se referem à necessidade de calibrações específicas para os materiais presentes nas enxurradas de cada parcela; no que diz respeito ao posicionamento dos turbidímetros para a aquisição dos dados de concentração de sedimentos sem que haja entupimentos e obstruções; e em relação a resíduos na superfície do elemento sensor (no sistema até o momento implantado deve ser realizada uma limpeza do mesmo após cada evento de chuva).

Uma alternativa seria a utilização de um limpador (tipo esguicho), possivelmente o mesmo equipamento utilizado em pára-brisas de carros, com um acionador conectado ao *logger* em que ocorra uma pequena descarga no elemento sensor após seja detectado o fim do evento de escoamento nos transmissores de nível. Em relação a este último aspecto, destaca-se que no momento está sendo avaliada a alternativa de adaptação de um elemento negro (uma tubulação) especialmente desenvolvida para que o elemento sensor do turbidímetro se posicione rente à superfície do mesmo, evitando os entupimentos.

Um aspecto da interpretação dos resultados que deve ser levado em conta na seleção destes intervalos de aquisição de dados, no que diz respeito ainda ao escoamento superficial automatizado, refere-se ao intervalo de aquisição de dados de precipitação pluvial, uma vez que esta informação é a grande limitante.

Nas avaliações realizadas a medição em intervalos reduzidos do escoamento superficial teve como meta avaliar o limite de aquisição em termos temporais, pois este determina o limite para a interpretação dos registros de precipitação. Nesta tese as avaliações de precipitações foram obtidas em intervalos mínimos de mm/15 min, intervalo utilizado para a interpretação dos registros de níveis nas calhas.

Seria pertinente avaliar a precipitação em uma escala de tempo mais detalhada, o que seria viável mediante o estabelecimento de uma programação de aquisição de dados na estação onde, a partir de determinado registro de precipitação, o intervalo de aquisição poderia passar de minutos para segundos. O monitoramento dos níveis na calha pode responder a este mesmo comando, e tudo isso pode ser efetuado através do ambiente de programação convencional disponível no *software* da estação SOLAR, uma vez que se acople um pluviômetro nesta mesma, especificamente para estas avaliações. Destaca-se que seu bom posicionamento neste caso será determinante no desempenho final do sistema.

6.6. Perfis de Sucção e Umidade

Observando-se os resultados de perfis de sucção e umidade foi constatado que o talude esteve em um estado não-saturado durante todo o período de monitoramento.

As sucções desenvolvidas sob este tipo de material são muito elevadas, tendo sido registrados valores superiores à 200kPa em vários pontos durante boa parte do período de monitoramento, o que não impediu, entretanto, o desenvolvimento da vegetação, uma vez que o ano foi marcado por uma boa distribuição de chuvas. Observou-se ainda uma maior variabilidade dos potenciais matriciais no período chuvoso, inclusive com maior amplitude no que diz respeito às sucções mais elevadas.

Pode-se deduzir que a manutenção da umidade necessária ao atendimento da demanda hídrica nas parcelas se deu nos primeiros centímetros de profundidade, talvez acima dos 0.25m, o que faz com que raramente as sucções cheguem mais perto da saturação em profundidade, em função da reduzida permeabilidade e valor de umidade de entrada de ar presentes nos materiais.

No que diz respeito às calibrações dos FDR, foi obtido um coeficiente angular substancialmente maior em relação à equação de calibração de fábrica, além de um pequeno decréscimo nos coeficiente lineares, o que provavelmente ocorre provavelmente em função de particularidades relativas à distribuição granulométrica, curva de retenção de umidade, micromorfologia e mineralogia dos solos residuais tropicais. Notou-se que a inclusão de pontos através do secamento dos solos na estufa e aferição logo após o secamento evitando o aumento da umidade quando exposto ao ar se mostrou importante (Método II). Em nenhum outro método foi possível incluir os menores valores de RAW encontrados no monitoramento de campo para os dias mais secos.

Apesar da inclusão dos menores valores de RAW ter sido importante para a interpretação dos dados, observa-se que os resultados das interpretações dos monitoramentos de campo utilizando as curvas de calibração propostas por vezes mostraram problemas relacionados a picos muito elevados de umidade durante as maiores chuvas, para o que talvez seja pertinente a avaliação da possibilidade de utilização de ajustes polinomiais para estas equações de calibração.

No que diz respeito ao monitoramento da sucção através dos GMS, a instrumentação se mostrou funcional. Devido à limitação com relação à cavitação, normalmente estes não são inseridos no solo de forma irreversível, isto é, são colocados em campo de forma similar ao tensiômetro através da adaptação a tubos PVC. Isto levaria a um possível problema. Uma questão na situação em estudo é a formação de fluxos superficiais preferenciais e de percolação com a instalação dos

instrumentos, tendo sido usado um método alternativo de instalação, sem recuperação das sondas (enterramento).

O método em si se mostrou adequado, uma vez que os furos de sondagem onde foram inseridas as sondas se fecharam fortemente após a instalação dos instrumentos, e foi detectada grande variabilidade das sucções ao longo dos perfis avaliados nos diferentes pontos de monitoramento, o que indica que a umidade presente no solo não apresentou qualquer relação com a instalação desta instrumentação durante o período avaliado. Em relação ao escoamento superficial pode ser dito o mesmo uma vez que a superfície do solo nos pontos de instalação ficou uniforme com o tempo, apresentando relações apenas com a erosão geral ocorrida.

No que diz respeito às relações entre as respostas dos dois instrumentos, primeiramente observou-se a necessidade de cautela na interpretação das informações uma vez que os seus tempos de resposta são bastante diferenciados. Como visto no Capítulo V, os resultados das comparações entre os diferentes pares de dados de Ψ e θ adquiridos no decorrer do período de monitoramento mostram valores de θ em geral menores que os esperados para os mesmos níveis de sucção com base nas curvas de retenção de umidade obtidas em laboratório.

A escolha das profundidades e pontos de avaliação se mostrou bastante pertinente, sendo no futuro talvez a instalação inclusive de instrumentos mais rasos visando avaliar aspectos detalhados do balanço energético de superfície. Os terços de avaliação mostraram uma excelente alternativa na identificação de diferenças no comportamento da vegetação e no desempenho das técnicas de bioengenharia em função das posições no talude.

Um aspecto que chamou a atenção neste sentido foi a variabilidade dos perfis de temperatura dos solos, cuja influência se mostrou pronunciada tanto nos GMS quanto nos FDR para pequenos intervalos de coletas de dados. Seria pertinente a avaliação destes perfis de temperatura em relação às leituras dos FDR a fim de se estabelecer os fatores de correção necessários, já que a relação existente entre temperatura e sucção estimada no GMS é calibrada dentro do próprio *logger Monitor 900M*.

6.7. Balanços Hídricos

Um dos pontos chaves no desenvolvimento desta tese foi a estimativa dos balanços hídricos de cada parcela em estudo. As avaliações tiveram como inovação a associação de um conjunto particular de variáveis medidas em campo, tendo sido necessária para a interpretação destas a utilização da formulação original da equação de Penman-Monteith no cálculo da ET_{rc} .

Além dos parâmetros da vegetação e atmosféricos, foram avaliados Ψ e θ simultaneamente, em diferentes pontos dos solos, numa malha complexa, para as diferentes técnicas de bioengenharia, em um mesmo talude, mesmas condições de solo e uso anterior. Valores registrados simultaneamente foram usados no cálculo do estresse hídrico (GMS) e o cálculo do armazenamento e recarga freática (FDR), o que se mostrou uma metodologia interessante para estas análises comparativas.

No que diz respeito aos ganhos e déficits hídricos nas parcelas, como a redução do escoamento superficial foi maior na Parcela IV, a infiltração nesta mesma foi maior, e com uma maior infiltração acumulada foi possível obter um saldo acumulado de água (mm) no primeiro metro do solo cerca de 1600% em relação à Parcela II, sendo que na Parcela I este ganho foi similar ao encontrado na Parcela III.

Analisando períodos mensais, observa-se que houve maior variabilidade nas respostas na Parcela III em relação à Parcela I, ocorrendo maior déficit hídrico na primeira nos meses mais secos do ano como ocorreu a partir de junho de 2009. Observa-se que a maior infiltração existente na Parcela I em relação à III não formou uma diferença substancial nas recargas porque houve uma ET_{rc} maior nesta primeira (os aumentos em ambos os casos foram da ordem de 400%).

6.8. Monitoramento de Campo e Simulações Numéricas

Um primeiro aspecto em relação às simulações diz respeito à seleção do tipo de modelo utilizado. Como o interesse maior foi avaliar o sistema solo-planta-atmosfera, o programa VADOSE/W2007, devido às formulações presentes, que priorizam problemas acoplados de solo e condições atmosféricas, se mostrou uma boa alternativa.

A possibilidade da inclusão de parâmetros como funções de crescimento radicular, padrão de arquitetura radicular, funções de crescimento de área foliar (IAF), além da versatilidade em relação à geração da malha de elementos finitos foram pontos que chamaram a atenção e deram um caráter mais realista às simulações, uma vez que estes podem ser incluídos também nas avaliações analíticas.

Conforme frisado, os materiais presentes no talude apresentaram um comportamento hidráulico bastante complexo, tendo sido identificadas curvas de retenção de umidade bimodais para pelo menos duas das camadas avaliadas (VA e A). Devido a isso, e devido ao foco na relação entre os parâmetros Ψ e θ adquiridos em campo com resultados de simulações para estes mesmos, foram primeiramente determinadas funções de permeabilidade, necessárias nas simulações, através do método de ajuste de Fredlund *et al.* (1994), tendo sido geradas curvas bimodais. Os resultados destas avaliações não convergiram, tendo sido necessária uma reavaliação das curvas de permeabilidade e também de sucção.

Apesar de não ter se correlacionado bem com os resultados experimentais, as simulações numéricas em caráter comparativo se mostraram pertinentes uma vez que foi possível investigar aspectos como a resposta do modelo em função do tipo de ajuste utilizado na determinação das curvas de retenção de umidade e funções de permeabilidade dos solos, ou o quanto a histerese dificulta a interpretação nestes tipos de avaliações.

Aspectos como heterogeneidades inerentes às camadas do perfil, equações de calibração dos FDR e suas limitações práticas, bem como a própria histerese presente nos solos, somam-se como obstáculos nestes tipos de comparações.

6.9. Sugestões para Pesquisas Futuras

- Desenvolvimento de calibrações dos FDR em câmaras triaxiais com utilização de corpos de prova indeformados.
- Desenvolvimento de calibrações de FDR levando em conta perfis de temperatura dos solos.
- Utilização do *WEPP* para simulação de perdas de solo em eventos de escoamento superficial automatizado, visando estimar valores específicos para

estes eventos e calibrar valores de concentração de sedimentos obtidos em registros de turbidímetros.

- Adaptação de um elemento negro, uma tubulação específica para a medição dos turbidímetros no corpo do sistema de adaptação das calhas Parshall, às caixas coletoras de erosão. Isto deverá ser realizado preferencialmente dentro da caixa.
- Avaliação de funções de crescimento, índices de área foliar, crescimento radicular e demais parâmetros da vegetação em maior detalhe para comparações com as avaliações já realizadas e na parametrização dos balanços hídricos.
- Avaliações de perfis de condutância estomática, visando incluir estes valores nas avaliações pela formulação original de Penman-Monteith.
- Investigações das relações entre os tempos de resposta dos GMS e FDR no que diz respeito ao comportamento dos pares de valores de Ψ e θ . Observa-se que o menor tempo de resposta dos GMS em relação ao FDR pode limitar a interpretação dos resultados de campo, principalmente quando feitas comparações com simulações numéricas de fluxos.
- Avaliações de efeitos de outras técnicas de bioengenharia de solos no talude, através de replantio e revezamento de tratamentos.
- Avaliações de efeitos de reforço radicular, através de ensaios *in-situ* de arrancamento e cisalhamento direto em solos reforçados com raízes, mediante a adaptação de instrumentação específica (ver anexo IV). Estas pesquisas deverão ser conduzidas preferencialmente em áreas onde foram conduzidos plantios semelhantes, porém evitando o talude para não provocar alterações demasiadas em sua resposta hidrossedimentológica, que continua a ser avaliada.