



PROCESSOS HIDROGEOQUÍMICOS DE TRANSFORMAÇÃO DE SOLOS TROPICAIS: UM EXEMPLO DO SUL DA AUSTRÁLIA

E. Fritsch^{1,2}, J. Cox³, R.W. Fitzpatrick^{3,4}

¹Nupegel - USP, Caixa Postal 3386, CEP 01060-970, São Paulo, SP

²ORSTOM, Departamento TOA (UR 12: Géosciences de l'Environnement Tropical), França

³Cooperative Research Centre for Soil and Land Management, South Australia, 5064

⁴CSIRO, Division of soils, Private Bag No 2, Glen Osmond, South Australia, 5064

Recebido em 02/97; aprovado para publicação em 09/97

ABSTRACT

Recent increases in waterlogged, dry land salinity and water erosion in the high rainfall area of the Mount Lofty Ranges (South Australia) progressively reduce the productivity of pastures of the region. In order to better understand the hydrogeochemical processes involved in such land degradation a 400 m toposequence was selected. The toposequence is representative of the succession of soil types and soil features down the slopes of the Ranges. Soil profiles were described and soil materials sampled down the toposequence for mineralogical, petrographic and geochemical investigations. Nested piezometers were also installed in twelve sites to determine the depth of the water tables and water samples collected for chemical analyses.

This hydro-pedological study relates (i) redoximorphic features to waterlogged areas and (ii) saline-sodic features to recharge and discharge of fresh and saline groundwater aquifers. It also permits to deduce whereas the ecosystem has been placed into disequilibrium from the comparison between the soil-landscape patterns and the actual hydrological regimes.

RESUMO

Nas paisagens montanhosas e úmidas da Serra do Monte Lofty (Austrália do sul), o desenvolvimento recente de zonas alagadas, salinizadas e erodidas reduziu progressivamente a produtividade das pastagens da região. Para adquirir o conhecimento de base sobre os processos hidrogeoquímicos envolvidos na degradação recente (um século) destas pastagens, uma topossequência de 400 m de comprimento, representativa das principais diferenciações pedológicas da região, foi escolhida. Perfis foram descritos e amostras de solo coletadas ao longo da topossequência para os estudos mineralógicos, petrográficos e geoquímicos. Doze sítios foram equipados com piezômetros para medir os níveis dos lençóis e amostras de água foram coletadas para análise química.

Este estudo de hidro-topossequência permite relacionar (i) as manifestações de hidromorfia no solo ao desenvolvimento de zonas alagadas e (ii) as zonas salinizadas-sódicas à recarga e descarga das águas doces e salinas dos sistemas de lençóis, como também inferir a colocação eventual em desequilíbrio do sistema solo-água através da comparação entre as organizações e os diferentes funcionamentos hidrogeoquímicos associados à expansão destes processos na paisagem.

INTRODUÇÃO

A Austrália é o continente do globo que contém a maior área de solos salinos e sódicos (Northcote & Shene, 1972; Szablocs, 1989). Estes solos são abundantes na parte árida e central deste continente. Nas bordas mais chuvosas do continente e, particularmente, na Austrália do sul, esses solos ocupam superfícies menores. A salinização dos solos pode ser natural ou de origem antrópica. A salinização secundária está ligada à irrigação dos solos com água salinizada ou ao desmatamento excessivo das paisagens florestais (Fitzpatrick *et al.*, 1994).

Nas paisagens montanhosas e úmidas do Monte Lofty, ao norte de Adelaide, a salinização recente dos vales é atribuída ao desmatamento durante a instalação dos primeiros fazendeiros no século passado e ao desenvolvimento de uma exploração pecuária. A substituição da floresta por pastagens, que utilizam menos água, favoreceu a subida dos lençóis variavelmente salinos, durante várias décadas (Nulsen & Henscke, 1981). Por isso, a salinização dos solos nessas paisagens montanhosas está, geralmente, associada a problemas de saturação pela água e de erosão (Fritsch & Fitzpatrick, 1992). O desenvolvimento recente de zonas salinizadas, alagadas e erodidas reduziu progressivamente a produtividade das pastagens, o que inquieta os fazendeiros. Isso levou o CSIRO a desenvolver um programa de pesquisa para, de um lado, adquirir o conhecimento de base sobre os processos que degradam essas paisagens e, por outro lado, propor manejos agrícolas com o objetivo de limitar e, se possível, impedir

essas degradações (Fitzpatrick *et al.*, 1994). O estudo aqui apresentado pertence à primeira parte deste programa de pesquisa. O objetivo deste trabalho é, em particular, estudar a associação entre a organização dos solos na vertente (anatomia das paisagens) e o funcionamento hidrogeoquímico atual destes (fisiologia das paisagens), assim como inferir, dessa comparação, o caráter atual ou passado dos processos associados à degradação dos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área de estudo

O estudo foi realizado na bacia de Herrmann (Fig. 1), 10 km a nordeste de Mt Torrens, na Austrália do sul. A bacia, com 130 ha de área, é representativa da parte leste da Serra do Monte Lofty, no que se refere ao clima, à geologia, aos tipos de solo e de cultura. A pluviosidade média anual é de 680 mm e a evaporação média anual de 1170 mm. A maioria das chuvas cai entre os meses de maio a outubro. A paisagem é constituída por colinas com topos convexos (declive máximo de 25%), vertentes convexo-côncavas (declive < 8%) e vales que deságuam em planície nos grandes eixos de drenagem (declive < 2%). Espigões e rios seguem as duas direções estruturais do substrato rochoso (nordeste-sudoeste: fraturamento; norte-sul: xistosidade). Este substrato corresponde a intercalações de micaxistos e arenitos dos metassedimentos Cambrianos do grupo Kanmantoo (Campana, 1958; Daily *et al.*, 1976). Localmente, estes sedimentos são atravessados por bancos de

pirita e de pegmatito. Há mais de um século, os imigrantes australianos cortaram a vegetação natural constituída principalmente por eucaliptos, substituindo a paisagem florestal por pastagens para a criação de bovinos e carneiros.

Os espigões e os topos das vertentes são cobertos por solos ferralíticos vermelhos, pouco espessos (< 1 m), sobrepostos a uma zona branca (*pallid zone*), mais espessa (< 3 m), fortemente alterada, com caulim e bancos de ferricretes hematíticos. As partes inferiores das vertentes apresentam solos ferralíticos amarelos, igualmente pouco espessos (< 1 m), sobrepostos a metassedimentos xistosos e areníticos pouco alterados, com mergulho subvertical. Os solos amarelos a cinzas da planície são um pouco mais espessos na bacia estudada (< 3 m). Formaram-se sobre depósitos alúvio-colúviais.

A descrição detalhada de quatro toposseqüências e a cartografia de uma zona teste de 25 ha mostram que a distribuição lateral dos solos nas vertentes é invariavelmente a mesma (Fritsch & Fitzpatrick, 1994). Por isso, uma toposseqüência, de 400 m de comprimento (Fig. 2), reagrupando o conjunto das organizações pedológicas, foi escolhida para os estudos mineralógicos, petrográficos, geoquímicos e hidrológicos. Segundo a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1992) e a classificação brasileira (Bertoldo *et al.*, 1992), a seqüência de solos ao longo da vertente, de montante para jusante, é a seguinte: *Typic Palexeralfs* (Podzólicos Vermelho-Amarelos) no topo e na meia vertente, *Albic Glossic Palexeralfs* (Solos Hidromórficos) na base das ver-

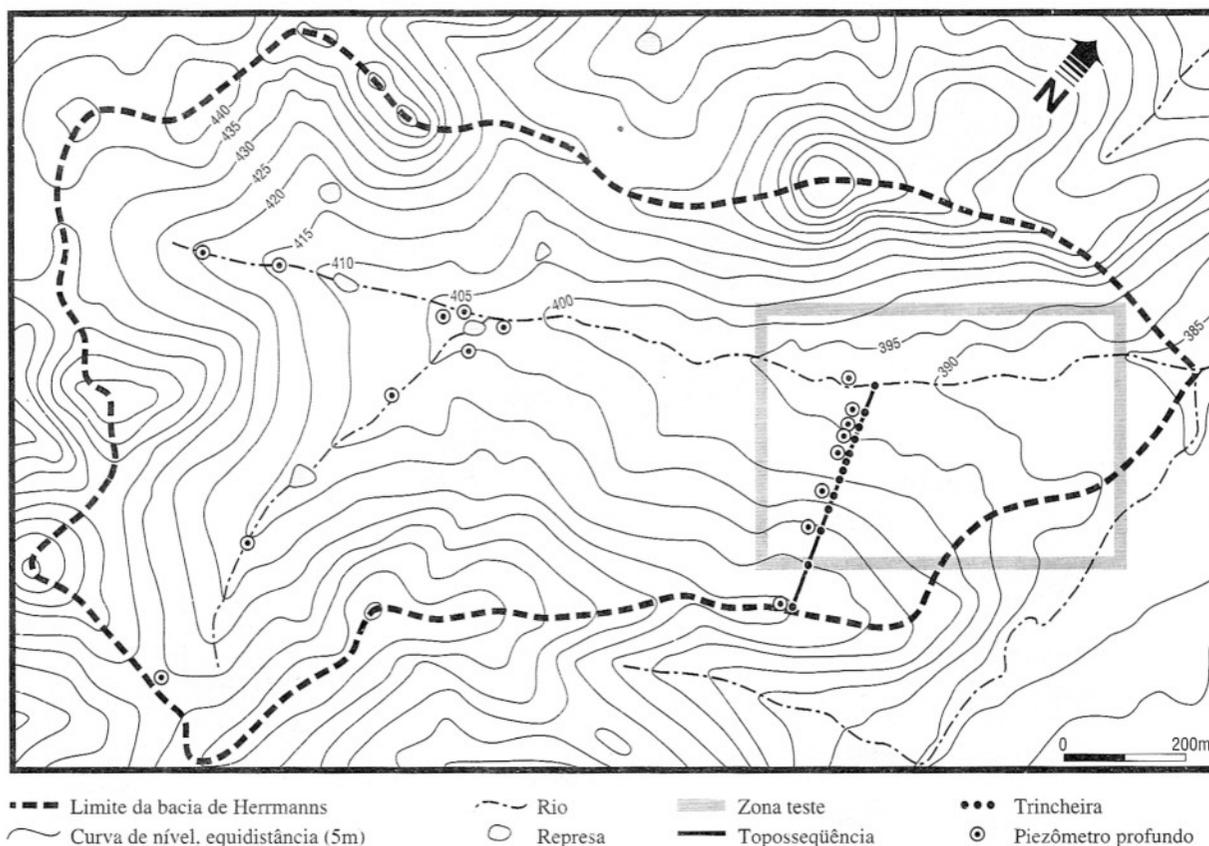


Figura 1 - Mapa da bacia de Herrmanns mostrando as curvas de nível, a topossequência na zona teste e a localização dos piezômetros.

tentes, e *Natraqualfs* (Solonetz Solodizado) na zonas planas, ou seja, nos vales e na planície colúvio-aluvial. Esta seqüência de solos corresponde igualmente aos *Duplex soils* vermelhos, amarelos e cinzas da classificação australiana (Northcote, 1979). Verticalmente, estes solos são caracterizados por uma transição textural e estrutural abrupta, à profundidade de 0,2-0,5 m entre os horizontes superiores A2 (E) areno-argilosos a arenosos e os horizontes argilosos (Bt ou Btn) subjacentes. As variações laterais traduzem um acréscimo das manifestações de hidromorfia e o desenvolvimento de uma sodicidade e salinidade para jusante. Na topossequência, as principais organizações pedológicas fo-

ram reagrupadas em grandes conjuntos, chamados sistemas pedológicos ou sistemas de transformação, segundo o método preconizado por Boulet *et al.* (1982) e Fritsch *et al.* (1992).

Análises mineralógicas, petrográficas e químicas

As amostras de solo para as análises mineralógica e química foram coletadas ao longo da topossequência (1 a 12, Fig. 2), em outubro de 1991. A mineralogia dos materiais foi determinada com ajuda da difração de raios X sobre amostras em pó, da microscopia ótica, do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e do microscópio eletrônico de transmissão (MET) acoplado à

espectroscopia de raios X com energia dispersiva e à difração de elétrons. A composição química desses materiais foi determinada por fluorescência de raios X. O pH foi medido a partir da mistura de 25 ml de água deionizada com 5 g de solo (< 2 mm) seco ao ar (Rayment & Higginson, 1992). A condutividade elétrica (um indicador de salinidade do solo) foi medida sobre extratos de pasta saturada (CEs). A capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada a pH 8,5 por NH_4Cl e os cátions trocáveis (Na, Mg, Ca e K) foram determinados por espectrometria de absorção atômica (Rayment & Higginson, 1992). Estas medidas permitiram calcular a taxa de saturação em sódio trocável

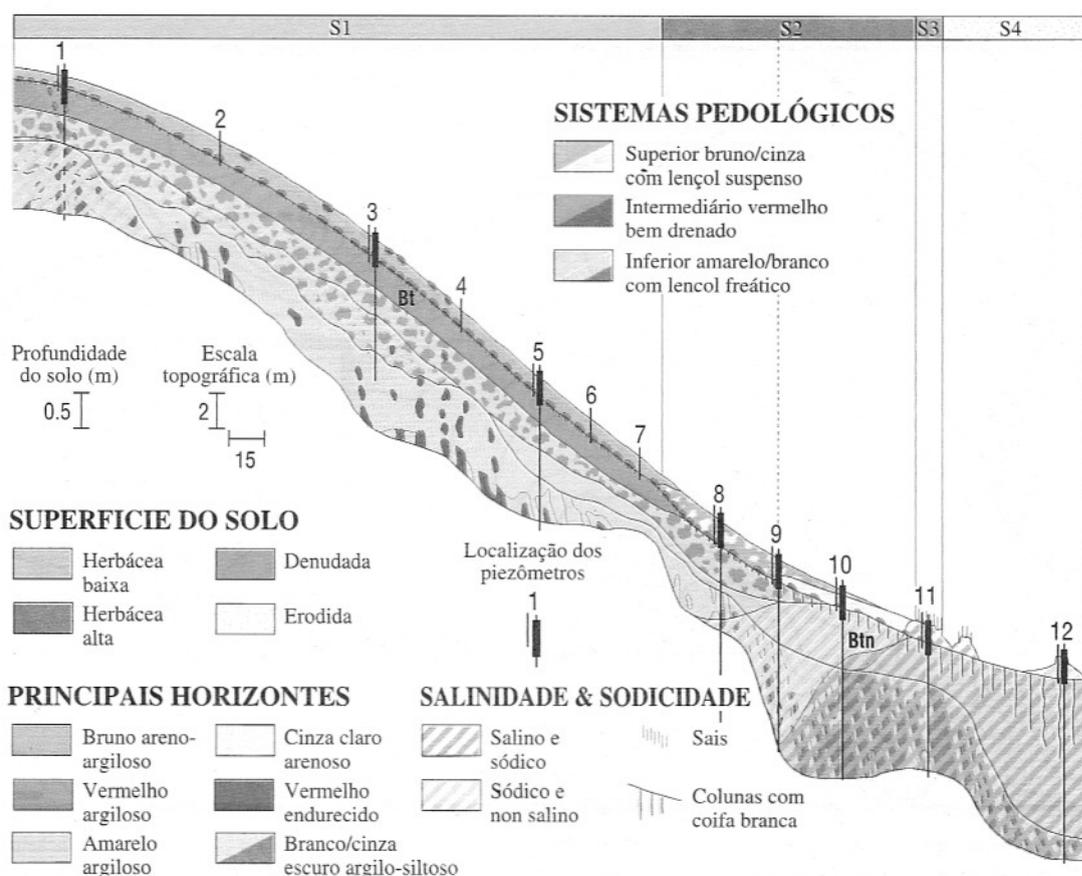


Figura 2 - Principais organizações pedológicas superficiais e internas da vertente (modificado segundo Fritsch & Fitzpatrick, 1994).

(ESP, um indicador da sodicidade do solo).

Medidas hidrogeoquímicas da água

Doze sítios foram equipados com piezômetros ao longo da topossequência (1 a 12, Fig. 2). Piezômetros pouco profundos (0,2 - 0,4 m), instalados nos doze sítios, permitiram medir os níveis do lençol suspenso. A tradagem, para a instalação destes piezômetros, atingiu os primeiros 0,05 m do nível argiloso. Um tubo de PVC de 0,03 m de diâmetro, perfurado, foi colocado no furo da tradagem. Piezômetros profundos (2 - 2,5 m de profundidade) foram instalados somente em oito sítios (Fig. 2). Eles per-

mitiram medir os níveis do lençol freático mais profundo. Para isso uma tradagem foi feita até a zona de alteração. Foi colocado, em cada tradagem, um tubo de PVC de 0,05 m de diâmetro, o qual foi perfurado nos 0,5 m finais. Para evitar o escoamento superficial da água ao longo do tubo e a contaminação do lençol freático profundo pelo suspenso, um segundo tubo de PVC rígido de diâmetro maior (0,15 m), afiado na sua extremidade e centrado no piezômetro profundo, foi introduzido no solo até 0,5 m de profundidade. Nos sítios 9, 10 e 11, um terceiro piezômetro foi instalado a um metro de profundidade. No sítio 12, quatro piezômetros foram instalados a 1,8 m, 6,2 m, 12 m e 55,5 m de

profundidade.

O nível da água nos piezômetros foi medido a cada duas semanas durante uma estação chuvosa de seis meses (Agosto 1992 - Janeiro 1993). Algumas medidas, mais espaçadas e menos regulares, foram realizadas posteriormente. Depois de cada medida, amostras da água foram coletadas para análise química. A condutividade elétrica (CE), o pH, o teor em sílica e os teores dos íons principais (Na^+ , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} e HCO_3^-) foram medidos segundo Rayment & Higginson (1992).

A flutuação do topo do lençol suspenso foi modelizada utilizando os dados pluviométricos e aplicando a seguinte

fórmula (Cox *et al.*, 1996): $D_i = D_{i-1} e^{-\alpha \Delta t} + R \Delta t / \mu \alpha (1 - e^{-\alpha \Delta t})$, onde D_i é o nível do lençol no tempo i , D_{i-1} , o nível deste lençol no tempo $i-1$, $R \Delta t$, a altura de água de chuva durante o intervalo de tempo i e $i-1$, α , um primeiro parâmetro de ajuste que depende da condutividade hidráulica, e μ , um segundo parâmetro de ajuste ligado à macroporosidade do solo. Os parâmetros α e μ foram determinados empiricamente em cada sítio, ajustando a reta teórica sobre os pontos de medida. Estes dados permitiram calcular, para cada sítio, um índice de saturação (WDI %) durante o período de medida dos níveis dos lençóis suspensos (Cox *et al.*, 1996). Este índice é a razão da integral da superfície saturada durante o período considerado sobre a superfície atribuída ao reservatório do lençol suspenso.

RESULTADOS

Os quatro aspectos da superfície do solo

Na topossequência, quatro tipos de superfície, bem distintos, sucedem-se ao longo da vertente (S1, S2, S3 e S4, Fig. 2). As partes altas do modelado, onde a drenagem é melhor, apresentam uma cobertura herbácea baixa, mais ou menos densa, superexplorada (S1). As manifestações de atividade biológica, principalmente as fezes de minhocas, são bastante abundantes. Na parte inferior da vertente, a cobertura herbácea, pouco utilizada pelo gado, torna-se alta e densa (S2). *Romula rosea*, uma erva indicadora de solos periodicamente alagados, é abundante. As fezes de minhocas são igualmente abundantes. As áreas a montante das

zonas planas e baixas do modelado comportam superfícies quase denudadas (S3), apresentando numerosas manifestações de erosão laminar: crostas de erosão nas partes ligeiramente sobrelevadas e depósitos arenosos na rede anastomosada de pequenas ravinas. Perto do rio, estas superfícies denudadas estão substituídas por superfícies fortemente recortadas (S4). A erosão linear, com mais de 1 m de profundidade no leito do rio, propaga-se nas zonas denudadas (S3) e isola, localmente, montículos em forma de cuesta.

As variações sazonais do aspecto da superfície do solo são espetaculares neste tipo de paisagem. Assim, nas duas primeiras superfícies (S1 e S2), a cobertura herbácea, verde e vigorosa, na estação de chuva, torna-se seca e amarela, na estação de seca. As superfícies S3 são totalmente denudadas na estação de chuva. A água aflora de maneira permanente na superfície do solo. Estas superfícies úmidas, periodicamente erodidas por escoamento laminar, apresentam uma coesão fraca e, localmente, um aspecto de brejo, associado ao aparecimento, em período chuvoso, de domínios pretos (cristalização de pirita secundária) e de géis ocres avermelhados (ferrihidrita) (Fitzpatrick *et al.*, 1996). No início da estação seca, estas superfícies secam ligeiramente e uma cobertura herbácea esparsa, comportando, principalmente, *Hordeum marinum* (planta halófita indicadora de meio salgado), começa a crescer. Esta cobertura seca rapidamente durante a estação de seca e numerosas eflorescências brancas (cristais cúbicos de halita com finos intercrescimentos de gipso) e algumas fissurações poligonais aparecem na superfície do solo.

As superfícies fortemente erodidas (S4), lisas e úmidas na estação chuvosa, tornam-se, na estação de seca, rugosas, devido ao crescimento de cristais de sais no interior do solo, a uma profundidade de 0,002 m. Os montículos em forma de cuesta das bordas destas superfícies têm um aspecto típico de Solonetz. Durante as últimas décadas, os fazendeiros da região observaram que as superfícies mal drenadas (S2), denudadas (S3) e fortemente erodidas (S4) aumentaram. O aumento destas três superfícies, encaixadas uma na outra (S4 em S3 e S3 em S2), ocorre a partir dos rios em direção às partes altas do modelado.

Os três sistemas pedológicos

A Figura 2 mostra as principais matrizes ao longo da topossequência. Em função da cor, textura e estrutura, estas matrizes foram reagrupadas em três sistemas pedológicos: sistema superior bruno/cinza, sistema intermediário vermelho e sistema inferior amarelo/branco. O sistema vermelho intermediário acaba em cunha para jusante. Por isso, os dois outros sistemas (bruno/cinza e amarelo/branco) tornam-se diretamente superpostos na base das vertentes, nos vales e na planície.

O sistema superior bruno/cinza é constituído pelos horizontes A1 e A2 (E), arenosos a areno-argilosos, porosos, maciços com coesão fraca. Os horizontes A2 apresentam uma coloração uniforme bruno claro e uma textura areno-argilosa nas posições altas do relevo (segmento S1, Fig. 2). Na base da vertente, línguas verticais cinza claras aparecem dentro do horizonte bruno claro. Estas lín-

guas aumentam em número e tamanho para jusante. O horizonte bruno com línguas cinza claras é então substituído, lateralmente, por um horizonte uniforme cinza claro com textura arenosa (segmento S2, Fig. 2). Mais para a jusante, este horizonte cinza claro apresenta uma textura areno-argilosa na superfície denudada (segmento S3, Fig. 2), desaparecendo depois na superfície erodida (segmento S4, Fig. 2). Existe, assim, uma forte correspondência entre as mudanças de aspecto superficial do solo (S1→S2→S3→S4) e as diferenças pedológicas laterais do sistema superior bruno/cinza.

O sistema intermediário comporta horizontes Bt argilosos uniformemente vermelhos com estrutura poliédrica. Estes horizontes são constituídos por quartzo, caulinita e oxidróxidos de ferro (cerca de 2,5% de hematita e 5,5% de goetita). Uma ligeira degradação estrutural é observada na parte superior do sistema vermelho e atribuída ao desenvolvimento, durante a estação de seca, de pequenas colunas que apresentam, até cerca de 0,1 m de profundidade, uma coloração bruno clara (ligeira diminuição dos teores de ferro em relação aos horizontes vermelhos subjacentes).

O sistema inferior comporta um primeiro nível manchado, com coloração amarela dominante, sobreposto a um segundo nível, com coloração branca dominante. Estes dois níveis são atravessados por bancos de ferricretes vermelho violáceo escuro, subverticais, com bordas amarelas. Na parte superior, estes bancos curvam-se no sentido do declive e juntam-se, localmente, ao nível nodular da base do horizonte A2 (sistema superior bruno/cinza). Em

profundidade, o nível branco corresponde, aproximadamente, à zona de alteração. Este contém caulinitas brancas de grande tamanho em forma de acordeão. Para jusante, este nível branco, fortemente alterado, contém bandas cinza escuras subverticais (Fig. 2). Estas bandas correspondem a sedimentos xistosos e areníticos mais fracamente alterados (presença em quantidade bastante grande de biotita e clorita).

Em função dos teores em sal (principalmente sódicos) nos extratos de pasta saturada e no complexo de troca, os horizontes da toposseqüência foram reagrupados em três grandes grupos: horizontes salinos (CEs > 1 dS/m) e sódicos (ESP > 15); horizontes não salinos (CEs < 1 dS/m), mas sódicos (ESP > 15), e horizontes pouco ou não afetados pelos sais (CEs < 1 dSm e ESP < 15). A Figura 2 mostra a distribuição destes horizontes na toposseqüência. Segundo as Figuras 2 e 3, os horizontes sódicos, que bordejam ou que estão sobrepostos ao nível salino da jusante, localizam-se em meio não saturado ou nas zonas periodicamente saturadas pelos lençóis (água doce). Esses aparecem no sistema inferior amarelo/branco no topo e na base da vertente e no sistema bruno/cinza superior no montículo da jusante da superfície erodida. O nível salino corresponde, aproximadamente, às zonas constantemente ou frequentemente saturadas pela água. Esse aflora na superfície denudada e torna-se subaflorente na zona erodida.

Flutuações sazonais dos dois sistemas de lençol

As Figuras 3 e 4 colocam em evidência a existência de

dois sistemas de lençol: um lençol suspenso e um lençol freático mais profundo. A montante das superfícies denudadas e erodidas da bacia, estes dois lençóis flutuam em sistemas pedológicos distintos (Figs. 4a e 4b). O lençol suspenso aparece somente na estação de chuva no sistema superior bruno/cinza. A recarga deste lençol pouco profundo é muito rápida depois das chuvas. Este lençol aflora na totalidade das vertentes somente depois de 35 mm de chuva e esvazia-se em menos de 10 dias (Cox *et al.*, 1996). O lençol freático subjacente recarrega-se e esvazia-se mais lentamente no sistema amarelo/branco. Esta recarga em água faz-se essencialmente nas partes altas do relevo (ver, na Fig. 3, o volume profundo com saturação temporária pela água, em forma de domo, a montante do corte). A jusante, as flutuações do lençol são mais limitadas e a zona com saturação permanente está mais perto da superfície do solo (Fig. 3). Neste nível, a instalação de piezômetros a diferentes profundidades (piezômetros 9 a 12, Fig. 2) permitiu mostrar que a carga hidráulica aumenta com a profundidade do piezômetro e que estes aumentos são mais importantes no sítio 12, o sítio mais baixo na vertente (Fig. 4d). Este lençol está então sob pressão nas partes baixas do modelado, provavelmente conectado com os aquíferos mais profundos que circulam, preferencialmente, nas redes de fissuras dos metassedimentos parcialmente alterados.

Na parte inferior da vertente e mais para a jusante, o lençol profundo aproxima-se do lençol suspenso (Figs. 4a e 4b). Ao nível das superfícies denudadas, somente um lençol foi colocado em evidência a pouca profundidade (Fig. 4c). Na es-

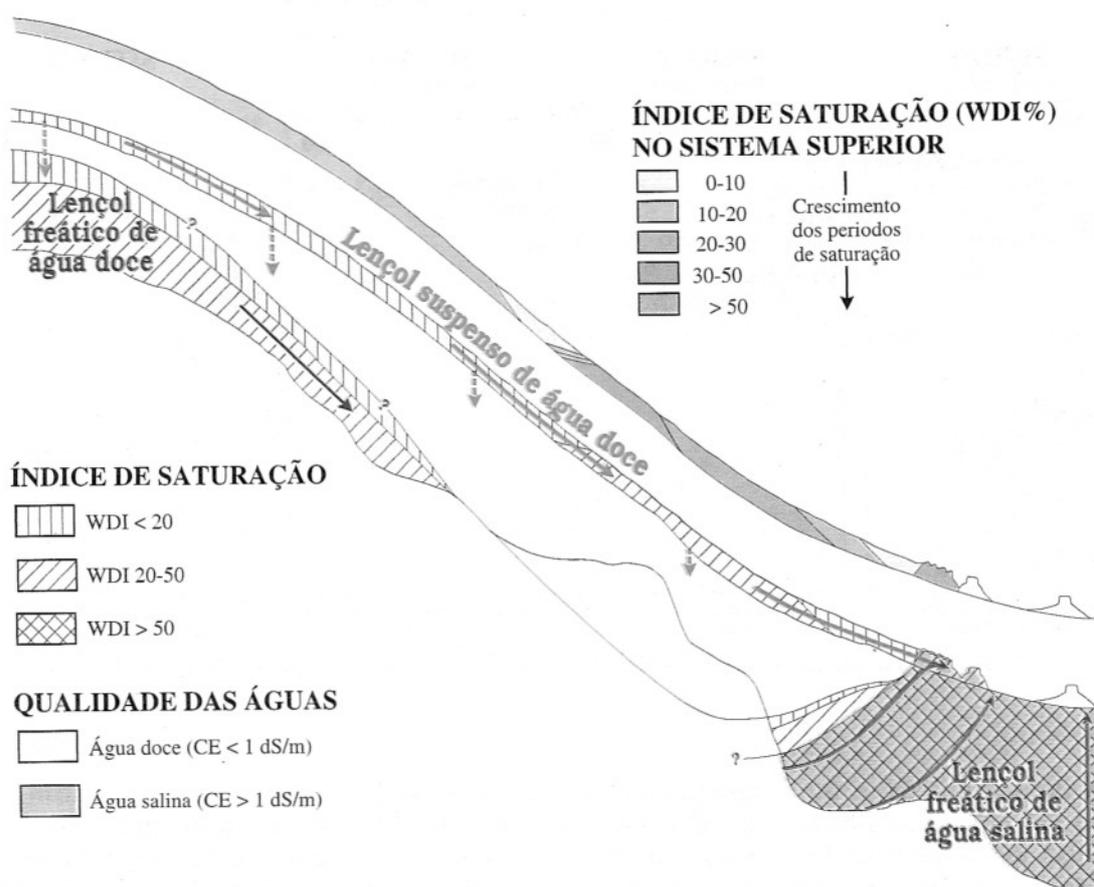


Figura 3 - Reservatórios dos lençóis, índice de saturação e qualidade das águas na vertente.

tação de chuva, a carga hidráulica deste lençol é freqüentemente positiva (nível da água nos piezômetros acima da superfície do solo), tornando-se negativa no período seco. Todavia, o topo do lençol desce raramente abaixo de 0,2 m de profundidade. Segundo estes dados, o lençol freático junta-se efetivamente ao reservatório do lençol suspenso na superfície denudada. Neste ponto, o lençol está sob pressão e o aumento da sua carga hidráulica na estação de chuva, ligada a uma recarga em água preferencial nas partes altas do modelado, permite escoamentos quase permanentes na superfície do solo. As superfícies denudadas correspondem, assim, a zonas de ressurgência do lençol freático profundo.

Índices de saturação do lençol suspenso na vertente

Os índices de saturação do lençol suspenso, calculados a partir dos dados de um período chuvoso de 6 meses, estão representados graficamente no corte superior da Figura 3. Estes índices, fracos no topo da vertente (7- 20%), tornam-se elevados a montante da baixa vertente (36 - 30%) e, depois, diminuem progressivamente para jusante (até 14%). Estes tomam-se muito elevados (56%) na superfície denudada. Assim, o aumento deste índice de saturação do topo para a base da vertente pode estar ligado aos escoamentos laterais do lençol suspenso, favoráveis a saturações mais prolongadas a jusante. A diminuição ulterior

deste índice nas posições baixas do modelado pode ser atribuída às ravinas da zona fortemente erodida, as quais se comportam como drenos naturais. Enfim, o índice elevado nas superfícies denudadas que bordejam a superfície erodida é devido à ressurgência do lençol freático profundo.

Geoquímica dos sistemas de lençol

A Figura 5 mostra, em forma de histogramas, as variações laterais da condutividade elétrica (indicador de salinidade da água) nos piezômetros pouco profundos (lençol suspenso) e profundos (lençol freático) instalados ao longo da topossequência (Fig. 2). Desde o topo da vertente até a parte montante

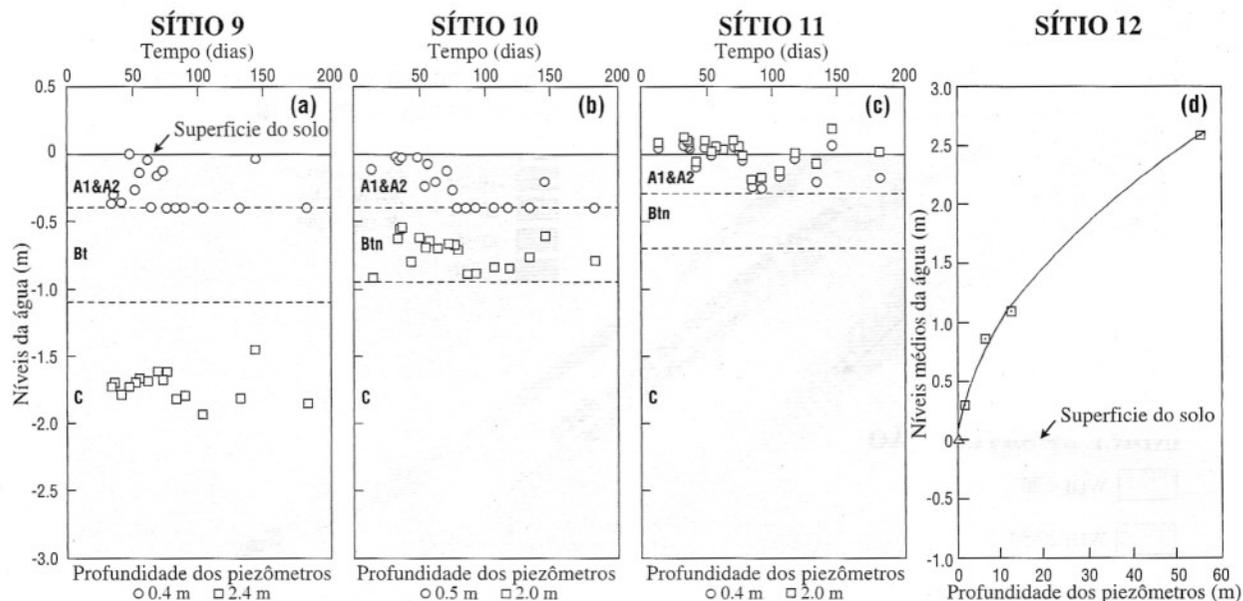


Figura 4 - Níveis dos lençóis na vertente (Sítios de 9 a 12 correspondem àqueles do corte da Figura 2).

da zona denudada (S1 e S2, Figs. 2 e 5a), a condutividade elétrica das águas amostradas nos piezômetros pouco profundos permanece fraca (CE < 1 dS/m) sendo aproximadamente constante. Por isso, o lençol suspenso corresponde a uma água doce. Esta condutividade elétrica aumenta brutalmente na zona denudada (S3, Figs. 2 e 5a, CE 5 dS/m) e, em seguida, diminui de novo fortemente no montículo da jusante da zona erodida (S4, Figs. 2 e 5a, CE 1 dS/m). Os valores obtidos no rio (ST, Fig. 5a) são aproximadamente equivalentes àqueles obtidos na superfície denudada. Nos piezômetros profundos, a condutividade elétrica é igualmente fraca (CE < 1 dS/m) nas partes altas do modelado (S1, Figs. 2 e 5b), aumentando progressivamente na parte baixa da vertente (S2, Figs. 2 e 5b). Na superfície denudada (S3, Figs. 2 e 5b), a condutividade atinge valores aproximadamente iguais àqueles dos piezômetros pouco profundos, che-

gando a valores máximos (CE 11 dS/m) na zona erodida (S4, Figs. 2 e 5b). Este aumento da condutividade elétrica para a jusante está ligado a um aumento do pH (6,3 - 8,5). Os valores superiores a 1 dS/m são observados nas zonas permanente ou freqüentemente saturadas pelo lençol freático profundo (WDI > 50, Fig. 3), que drena os bancos cinzas fracamente alterados da zona de alteração (Fig. 2). As diferenças entre máximo e mínimo, importantes no rio e no piezômetro pouco profundo da zona denudada, são mais fracas nos piezômetros profundos. Os máximos são atingidos em período de seca (ST: CE 8 dS/m) e os mínimos em período chuvoso (ST: CE 3 dS/m). Assim, o lençol freático profundo é salinizado nas zonas fracamente alteradas e com saturação permanente ou freqüente. O transbordamento do lençol nas zonas denudadas permite trazer os sais em superfície. Estes sais concentram-se nas águas e no solo durante os perí-

odos de seca com forte evapotranspiração. São diluídos durante a recarga e exportados durante a descarga dos sistemas de lençóis na vertente (ver as setas da Fig. 3, que indicam a natureza e a direção dos escoamentos).

A salinidade das águas do lençol freático é causada, principalmente, por Na^+ (12 - 2118 mg/l) e Cl^- (21 - 3332 mg/l). Os teores em Na^+ e Cl^- são fortemente correlacionados à condutividade elétrica. Mg^{2+} (< 292 mg/l), Ca^{2+} (< 230 mg/l), HCO_3^- (< 257 mg/l), CO_3^{2-} (< 53 mg/l) e SO_4^{2-} (< 6 mg/l) estão presentes em baixa quantidade.

DISCUSSÃO

Processos atribuídos à saturação pela água e às flutuações dos lençóis

O estudo mostra que existe uma concordância global entre o sistema pedológico e o tipo

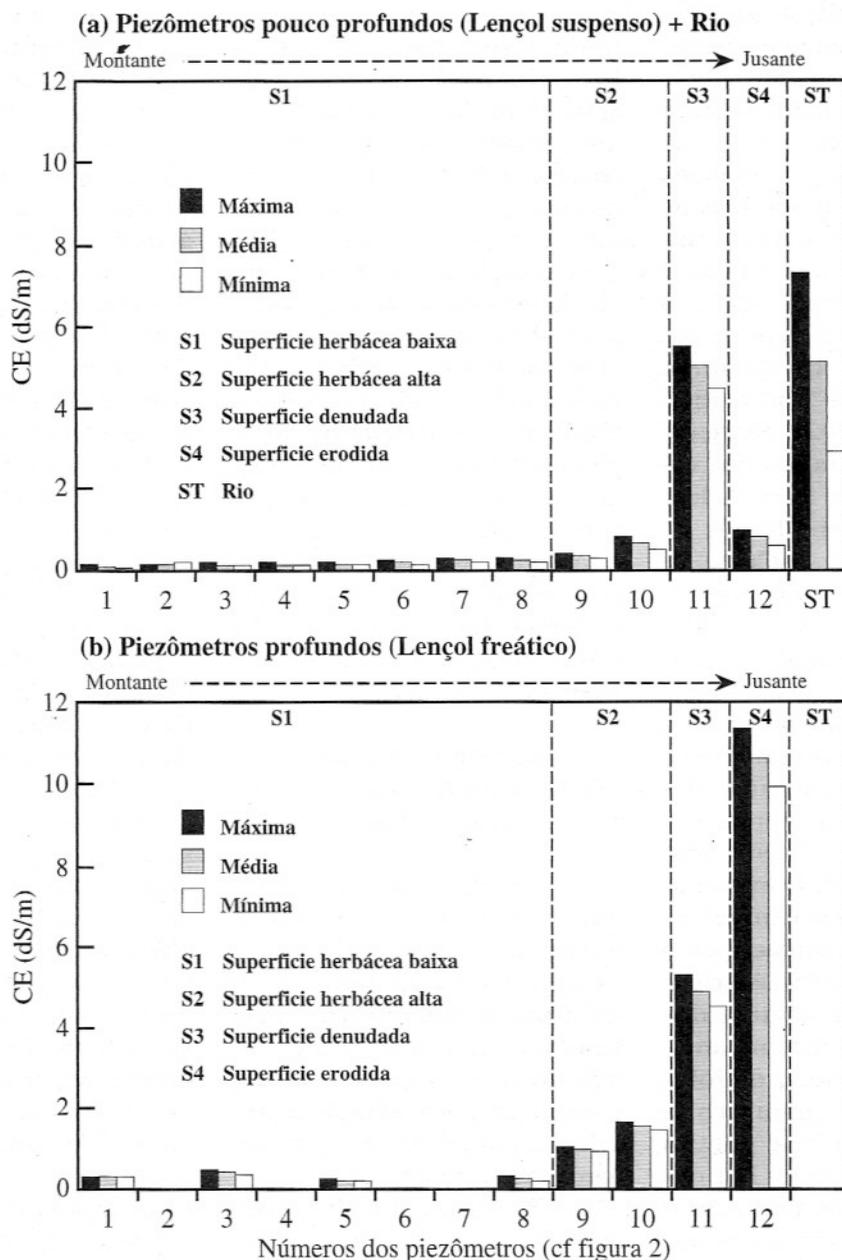


Figura 5 - Condutividade elétrica (CE): (a) do lençol suspenso nos piezômetros pouco profundos e (b) do lençol freático nos piezômetros profundos na vertente.

de escoamento: escoamento em meio não saturado para o sistema vermelho e em meio saturado para os outros dois sistemas. Assim, dois dos três sistemas pedológicos da bacia são ligados à saturação pela água e às flutuações de dois sistemas de lençóis: um lençol suspenso no sistema bruno/cinza superi-

or e um lençol freático no sistema amarelo/branco inferior. A montante das superfícies denudadas e erodidas dos vales, esses dois lençóis e seus reservatórios estão superpostos, mas distintos (separados pelo sistema vermelho intermediário). A jusante, o lençol freático profundo junta-se ao reservatório

do lençol suspenso. Esse lençol sob pressão é salino nas zonas freqüentemente saturadas e pouco alteradas da bacia. Chegando à superfície, ele desenvolve uma salinidade nos solos, destrói as pastagens e favorece a erosão. A recarga deste lençol pela água doce diminui sazonalmente esta salinidade.

Esta recarga, via lençol suspenso, é feita na alta vertente (escoamento vertical profundo) e nas superfícies denudadas (escoamento hipodérmico lateral).

Os processos associados à saturação pela água e às flutuações desses dois sistemas de lençol são de dois tipos. O primeiro processo é atribuído à redistribuição e à exportação dos oxihidróxidos de ferro ("redoximorfismo", no sentido de Vepraskas, 1992). Numerosos estudos mostraram que estas exportações de ferro podem estar ligadas às mudanças de cor dos solos (Curi & Franzmeier, 1984; Fritsch *et al.*, 1989; Schwertmann, 1993). Assim, o clareamento das matrizes vermelhas (aparecimento das matrizes bruno claro) e, em seguida, o embranquecimento das matrizes bruno claro são atribuídas às perdas em ferro e em argila (sistema bruno/cinza superior). O amarelamento das matrizes vermelhas, seguido do embranquecimento das matrizes amarelas, é atribuído à dissolução seletiva dos óxidos de ferro (sistema amarelo/branco inferior), dissolução que afeta primeiro a hematita e depois a goetita (Jeanroy *et al.*, 1991). Por outro lado, o clareamento ou o amarelamento das matrizes vermelhas resulta da saturação moderada (início da hidromorfia). O embranquecimento das matrizes brunas ou amarelas é resultado de uma saturação mais prolongada pela água (verdadeira hidromorfia) (Williams & Coventry, 1979; Moniz & Buol, 1982; Macedo & Bryant, 1987). O segundo processo é atribuído à redistribuição e à exportação dos sais (salinização e sodificação no sentido de Fanning & Fanning, 1989). A salinização dos solos é, geralmente, atribuída à sub-

da de lençóis salinos. Ao contrário, a dessalinização dos solos (eliminação dos sais pela água livre do solo) resulta de um rebaixamento do teto dos lençóis salinos e da lixiviação dos sais pelas águas doces durante a recarga desses lençóis. Esta dessalinização é acompanhada de uma sodificação dos solos (fixação do sódio no complexo de troca). Por lixiviação prolongada, o sódio é, progressivamente, eliminado do complexo de troca e os solos tornam-se não sódicos. Assim, as zonas sódicas são testemunhos de antigos reservatórios de lençóis salinos e as zonas salinas correspondem à posição atual das zonas, freqüentemente, saturadas pela água.

Exemplo de um ecossistema colocado em desequilíbrio

A comparação, na Figura 6, das zonas cinzas ou brancas e das zonas sódicas e salinas com as zonas, medianamente a freqüentemente, saturadas pela água mostram que existe, em três níveis na topossequência, uma clara discordância entre estas organizações e o funcionamento hídrico atual.

Em profundidade, constatamos que uma parte da zona descolorida não é mais atingida pelo lençol freático (I, Fig. 6). Ao contrário, a zona freqüentemente saturada (WDI > 50), que é nitidamente menor que a zona branca, corresponde, aproximadamente, à zona salinizada da jusante. Por outro lado, as zonas sódicas que dominam ou envolvem esta zona salina são muito importantes. Deduzimos disto que o lençol salino profundo desceu e que esta descida foi importante nas partes altas da paisagem.

Na parte do reservatório

do lençol suspenso, a zona medianamente saturada pela água (WDI 20-50) ultrapassa, para a montante, o horizonte bruno claro com retículos cinza claros (II, Fig. 6). Isso mostra que as zonas saturadas pela água desenvolveram-se nas vertentes por causa de uma subida dos lençóis. Mais para jusante, mas a montante da zona denudada, a zona cinza clara, que deveria estar freqüentemente saturada pela água, é invadida somente de maneira episódica (WDI < 20) pelo lençol suspenso (III, Fig. 6). Em conseqüência, ocorre, após o desenvolvimento das feições ligadas à hidromorfia, um abaixamento localizado destes lençóis, provavelmente ligado ao desenvolvimento das incisões lineares nos vales.

Estas discordâncias entre as organizações indicadoras de saturações prolongadas pela água (hidromorfia) e o funcionamento hídrico atual testemunham, nitidamente, um ecossistema colocado em desequilíbrio. A colocação desse ecossistema em desequilíbrio pode estar ligada aos principais eventos tectônicos e antrópicos que alteraram, profundamente, a paisagem (Fritsch & Fritzpatrick, 1994):

- elevação epirogênica, reativação da erosão e da alteração meteórica nos vales do início até o fim do Cenozóico (formação dos Montes Lofty). Estes eventos provocaram a descida dos lençóis e o desenvolvimento da sodicidade nos solos;
- desmatamento excessivo no último século, consecutivo à instalação dos colonos europeus (aparecimento das pastagens). Este desmatamento favoreceu, num primeiro momento, a subida do lençol suspenso (desenvolvimento nas vertentes das superfícies saturadas pela água:



Figura 6 - Comparação das zonas atualmente saturadas pelo lençol freático e o lençol suspenso, com as diferenciações pedológicas atribuídas à hidromorfia e às redistribuições dos sais pelos lençóis e as chuvas.

S2) e do lençol profundo (desenvolvimento nos vales de superfícies denudadas por salinização: S3). A saturação e salinização favoreceram a erosão linear nas superfícies denudadas (superfícies erodidas: S4). Isso provocou, localmente, o abaixamento dos lençóis e o desenvolvimento de uma sodicidade secundária.

Enfim, o estudo não permite determinar os índices de saturação favoráveis à formação de matrizes bruno claro, amarelas e brancas na paisagem, à medida em que estas matrizes não estão mais em fase com o funcionamento hídrico atual. Tais índices, valores limites, poderiam ser calculados somente em ecossistemas que

jamais foram colocados em desequilíbrio, nos quais a organização e o funcionamento hídrico estão em fase.

CONCLUSÕES

O trabalho evidencia todo o interesse em associar as medidas hidroquímicas com estudos topossequênciais, onde se analisa a mineralogia e as estruturas da paisagem. Somente estes estudos, associando anatomia e fisiologia das coberturas pedológicas, são capazes de mostrar o caráter atual ou passado dos processos hidrogeoquímicos que intervêm na diferenciação vertical e lateral dos solos; estes processos têm,

igualmente, uma repercussão indireta sobre a qualidade das águas dos sistemas pedológicos e dos grandes sistemas fluviais.

O estudo mostra, em particular, que a redistribuição e as exportações de ferro, associadas ao desenvolvimento das manifestações de hidromorfia na paisagem, podem ser relíquias em certos lugares e atuais em outros. Estas exportações limitadas de matéria, ligadas, aqui, ao clareamento e ao amarelamento das matrizes vermelhas e ao embranquecimento das matrizes brunas ou amarelas, são irreversíveis. Toda modificação do funcionamento hidrológico poderá, a partir daí, apagar as marcas de um funcionamento passado. Ao contrário, a

redistribuição dos sais na paisagem, associada ao desenvolvimento das zonas sódicas e salinizadas é, geralmente, o resultado de um funcionamento hidrogeoquímico atual. Com efeito, certas zonas sódicas podem tornar-se novamente salinizadas por causa da subida interanual de lençóis salinizados (em particular por causa de um desmatamento excessivo). Inversamente, estas zonas salinas podem tornar-se sódicas durante a descida interanual destes lençóis, por causa da lixiviação dos sais no período de recarga da água doce (em particular como consequência das incisões lineares da base das vertentes). Assim, os meios feralíticos intertropicais de transição entre clima seco e clima

úmido revelam-se particularmente interessantes a estudar à medida em que duas grandes famílias de processos (hidromorfia e salinização), estreitamente ligados ao funcionamento dos lençóis, agem simultaneamente. Desta maneira, é mais fácil determinar os escoamentos e os processos associados à degradação passada e atual destas paisagens.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo "Land and Water Resources and Development Corporation", pelo Programa ASO2 do CSIRO: "Soil and landscape processes affecting dryland salinity, waterlogging,

swelling and abrasiveness" e pela UR12 "Géosciences de l'Environnement Tropical" do Depto. TOA da ORSTOM. Os autores agradecem aos membros do "Tungillo Landcare Group" pelo encorajamento e assistência no campo. As pessoas do CSIRO que contribuíram para a realização deste trabalho foram as seguintes: Peter Self (MET), Stuart McClure (MEV), Damian Mowat (análises químicas), Greg Rinder (desenhos), Phil Davies e Jim Thompson (levantamento de campo). Os autores agradecem, também, a Heloisa Filizola, do CNPMA/EMBRAPA, e a René Boulet, da ORSTOM, pela versão em português do presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOULET, R.; HUMBEL, F.X.; LUCAS, Y. (1982) Analyse structural et cartographie en pédologie: II Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. Cahiers ORSTOM, série Pédologie, **19**:323-339.
- CAMPANA, B (1958) The Mt Lofty-Olary region and Kangaroo Island. In: M.F. Glaessner & L.W. Parkin (Eds.) The Geology of South Australia. J. Geol. Soc. Aust, **5**:3-28.
- COX, J.W.; FRITSCH, E.; FITZPATRICK, R.W. (1996) Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes: VII Water duration. Aust. J. Soil Res., **34**:803-824.
- CURI, N. & FRANZMEIER, D.P. (1984) Soil genesis, morphology and classification. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., **48**:341-346.
- DAILY, B.; FIRMAN, J.B.; FORBES, B.G.; LINDSAY, J.M. (1976) Geology. In: C.R Twidale; M.J Tyler; B.P. Webb (Eds.) Natural History of the Adelaide Region. R. Soc. S. Aust, p.5-42.
- MACEDO, J. & BRYANT, R.B. (1987) Morphology, mineralogy, and genesis of an hydrosesquence of Oxisols in Brazil. Soil Sci. Soc. Am. J., **51**:690-698.
- MONIZ, A.C. & BUOL, S.W. (1982) Formation of an oxisol-ultisol transition in Sao Paulo, Brazil: I. Double-water flow model of soil development. Soil Sci. Soc. Am. J., **46**:1228-1233.
- FANNING, D.S. & FANNING, M.C. (1989) Soil, morphology, genesis and classification. John Wiley & Sons, 395p.
- FITZPATRICK, R.W.; COX, J.W.; FRITSCH, E.; HOLLINGSWORTH, I.D. (1994) A soil-diagnostic key to manage saline and waterlogged catchments in the Mt. Lofty Ranges, South Australia. Soil Use Manage, **10**:145-152.
- FITZPATRICK, R.W.; FRITSCH, E.; SELF, P.G. (1996) Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes: V Development of saline sulfidic features in non tidal seepage areas. Geoderma, **69**:1-29.
- FRITSCH, E. & FITZPATRICK, R.W. (1994) Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes: I. A new method for constructing conceptual soil-water-landscape models. Aust. J. Soil Res, **32**:889-907 (color figs: 880-885).

- FRITSCH, E.; HERBILLON, A.J.; JEANROY, E.; PILLON, P.; BARRES, O. (1989) Variations minéralogiques et structurales accompagnant le passage "sols rouges-sols jaunes" dans un bassin versant caractéristique de la zone de contact forêt-savane de l'Afrique occidentale (Booro Borotou, Côte d'Ivoire). *Sciences Géologiques*, **42**(2):65-89.
- FRITSCH, E.; PETERSCHMITT, E.; HERBILLON, A.J. (1992) A structural approach to the regolith: Identification of structures, analysis of structural relationships and interpretations. *Sciences Géologiques*, **45**(2):77-97.
- JEANROY, E.; RAJOT, J.L.; PILLON, P.; HERBILLON, A.J. (1991) Differential dissolution of hematite and goethite in dithionite and its implication on soil yellowing. *Geoderma*, **50**(1/2):79-94.
- NORTHCOTE, K.H. (1979) *A Factual Key for the Recognition of Australian Soils*. 4th Edn, Rellim Tech Publs: Glenside, S. Aust., 82p.
- NORTHCOTE, K.H. & SKENE, J.K. (1972) *Australian soils with saline and sodic properties*. CSIRO Soil Pub. No. 27.
- NULSEN, R.A. & HENSCKE, C.J. (1981) Groundwater systems associated with secondary salinity in Western Australia. *Agricultural Water Management*, **4**:173-186.
- OLIVEIRA, J.B. de; KLINGER, T.; JACOMINE, P.; NUMES CAMARGO, M. (1992) *Classes gerais de solos do Brasil. Guia auxiliar para seu reconhecimento*. FUNEP, 203p.
- RAYMENT, G.E. & HIGGINSON, F.R. (1992) *Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods*. Inkata Press, Sydney, 205p.
- SCHWERTMANN, U. (1993) Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. *In*: J.M. Bigham & E.J. Ciolkosz (Eds.) *Soil Color*. Soil Sci. Soc. Am., Inc. Madison, Wisconsin (USA), p.51-69.
- SOIL SURVEY STAFF (1992) *Keys to Soil Taxonomy*, 5th edition. SMSS technical monograph No. 19. Pocahontas Press, Inc: Blacksburg, Virginia, 541p.
- SZABOLCS, I. (1989) *Salt affected soils*. CRC Press, Boca Raton, Florida 33431, 105p.
- VEPRASKAS, M.J. (1992) *Redoximorphic features for identifying aquic conditions*. North Carolina State University, USA. Technical Bulletin 301, 25p.
- WILLIAMS, J. & COVENTRY, R.J. (1979) The contrasting hydrology of red and yellow earths in a landscape of low relief. *In*: *The hydrology of Areas of Low Precipitation*. Proc. Canberra Symp., Int. Assoc. Sci. Hydrol., Publ., **128**:385-395.