

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

USO DO RADAR PENETRANTE NO SOLO (GPR) NA INVESTIGAÇÃO DOS SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS NO LITORAL NORTE DO ESTADO DA BAHIA⁽¹⁾

**J. M. UCHA⁽²⁾, M. BOTELHO⁽³⁾, G. S. VILAS BOAS⁽⁴⁾,
L. P. RIBEIRO⁽⁵⁾ & P. S. SANTANA⁽⁶⁾**

RESUMO

Foram estudados nove perfis ao longo de uma toposseqüência sobre os sedimentos do Grupo Barreiras, na Fazenda Rio Negro, município de Entre Rios (BA), utilizando a prospecção eletromagnética por meio do Radar Penetrante no Solo - "Ground-penetrating radar - GPR", objetivando analisar a utilização dessa ferramenta na aquisição de informações sobre as feições que ocorrem no solo, mediante a comparação entre os radargramas obtidos e a descrição pedológica. O equipamento utilizado foi um Geophysical Survey System modelo GPR SR system-2, com antena de 80 MHz. A análise radargramétrica confirmou o aparecimento dos fragipãs e duripãs em profundidade, que ocorrem sempre acompanhados de um processo de transformação dos solos do tipo Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo em Espodossolo. Os padrões de reflexão mostram claramente os domínios dos solos argilosos e dos solos arenosos, com e sem a presença dos horizontes endurecidos.

Termos de indexação: prospecção do solo, gênese do solo, Grupo Barreiras.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em setembro de 1999 e aprovado em setembro de 2001.

⁽²⁾ Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia – CEFET-Bahia. R. Emídio dos Santos s/n, CEP 40300-010 Salvador (BA). E-mail: ucha@cefetba.br

⁽³⁾ Professor de Geofísica, Universidade Federal da Bahia – UFBA. R. Barão de Geremoabo s/n, CEP 40170-290 Salvador (BA). E-mail: botelho@pppg.ufba.br

⁽⁴⁾ Professor de Geologia, UFBA. E-mail: gsvboas@pppg.ufba.br

⁽⁵⁾ Professor de Geoquímica e Meio Ambiente, UFBA. E-mail: lucedino@ufba.br

⁽⁶⁾ Pós-Graduanda em Geoquímica e Meio Ambiente, UFBA. E-mail: patyana@ufba.br

SUMMARY: *EXPERIMENTAL USE OF GROUND-PENETRATING RADAR (GPR) TO INVESTIGATE TABLELANDS IN THE NORTHERN COAST OF BAHIA, BRAZIL*

Nine profiles were studied along a toposequence developed on Barreiras Group sediments, in Fazenda Rio Negro, Entre Rios, Bahia, Brazil. Besides conventional analysis, an electromagnetic probe through GPR - Ground-Penetrating Radar was employed. The objective of this study was to analyze the use of this tool in the acquisition of information on features occurring underground, by comparing the radargrams and pedologic descriptions obtained in the area. The equipment used was a Geophysical Survey model, with an 80 MHz antenna. The radargram results indicated that the antenna is not the ideal for risings, demanding a greater detail of the most superficial layers, up to 1.0 depth meter. Response was excellent for the deepest layers, mainly in probing the occurrence of hardened layers, such as the hardpan. The radargrametric analysis confirmed the existence of a process of transformation in Podzols, that occurs together with the hardpan and fragipan in depth.

Index terms: soil prospection, soil genesis, Barreiras Group.

INTRODUÇÃO

O GPR (Ground-Penetrating Radar), ou radar de penetração no solo, é uma ferramenta empregada pela geofísica na prospecção geológica, na detecção de fraturas em maciços rochosos e de espaços porosos em rochas carbonáticas, em estudos geotécnicos e como teste não-destrutivo na engenharia civil, dentre outras aplicações.

Embora tenha sido largamente difundido nos últimos 10 anos, ainda tem sido pouco utilizado na ciência do solo. Pode trazer interessantes contribuições para o entendimento das distribuições e transições entre os tipos de solos, principalmente entre solos que apresentam alto grau de diferenciação morfológica, como é o caso dos processos de transformação podzólica. O método de investigação em solos pelo radar detecta as mudanças abruptas das propriedades dielétricas (Tomer et al., 1996). Assim, feições mais marcantes, como o aparecimento de duripãs e fragipãs, são especialmente observadas ao longo do perfil obtido pelo radar.

O funcionamento do radar penetrante no solo baseia-se na produção de um pulso de alta frequência eletromagnética, que é transmitido para o solo e sua resposta é registrada em intervalos de tempo muito pequenos (nanossegundos). A propagação desse sinal no solo depende das propriedades elétricas dos materiais, que são controlados, principalmente, pela umidade. As diferentes propriedades elétricas dos materiais são responsáveis pela geração dos sinais refletidos, que são detectados, amplificados, digitalizados e estocados em meio magnético. Quanto menores a condutividade elétrica e a

constante dielétrica do solo, maior será a penetração do sinal, permitindo o emprego de fontes com mais altas frequências e, conseqüentemente, com maior resolução. Solos arenosos e em condição insaturada são os melhores para a pesquisa com o radar (Davis & Annan, 1989).

Os solos desenvolvidos sobre os tabuleiros costeiros no litoral norte do estado da Bahia apresentam a transformação podzólica como uma feição comum, bem distribuída por todo o domínio dos sedimentos do Grupo Barreiras. Como principais classes de solos que ocorrem na região, destacam-se os Latossolos Amarelos, os Argissolos Amarelos, os Argissolos Acinzentados e os Espodossolos. Esses solos, por suas características físicas, permitem um sucesso relativo na investigação por meio do radar, principalmente das camadas ou horizontes endurecidos em subsuperfície, como os níveis de fragipãs e duripãs que, em alguns casos, são bastante espessos. No entanto, horizontes endurecidos mais próximos à superfície, como os horizontes coesos, não são detectados por baixas frequências, o que explica a não-distinção dessas feições nos radargramas aqui apresentados.

MATERIAL E MÉTODO

Este estudo foi realizado na Fazenda Rio Negro, da Copener Florestal, no município de Entre Rios (BA). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cs, com temperatura média de 24°C, precipitação média de 1.280 mm. A área vem sendo cultivada com eucaliptos desde 1987.

A unidade lito-estratigráfica dominante é o Grupo Barreiras, de idade Plio-miocênica, composto por sedimentos terrígenos depositados por sistemas fluviais entrelaçados e leques aluviais (Vilas Boas, 1996).

A toposseqüência selecionada abrange 800 m e encontra-se dentro de uma vertente com mais de 1.500 m de extensão. Apresenta um sistema de transformação que se inicia em um Latossolo Amarelo argiloso, transiciona para um Argissolo Amarelo, passa para um Espodossolo, que ocupa uma área levemente abaciada no terço médio, e para um Latossolo Amarelo que, no final da vertente, grada novamente para um Espodossolo.

Os solos foram descritos segundo as normas e definições de Lemos & Santos (1996) e alguns critérios utilizados por Ribeiro (1998). Neste trabalho, são relatados apenas os dados morfológicos, relacionando-os com os perfis obtidos pelo radar.

O equipamento utilizado na pesquisa com o radar penetrante foi o Geophysics Survey Inc. modelo GPR SR system-2, com antena de 80 MHz de frequência, com comprimento de registro de 256 ns com 512 amostras por traço. O equipamento foi tracionado sobre toda a toposseqüência, registrando-se as principais feições para posterior abertura dos perfis. O GPR foi programado para a prospecção nas profundidades de 6 e de 15 m. As trincheiras foram abertas até à profundidade de 2,0 m. Adicionalmente, foram efetuadas tradagens entre os perfis e no fundo desses perfis. Os radargramas obtidos formam um contínuo, com o final de cada imagem correspondendo ao início da imagem subsequente, propiciando uma visão completa do solo da toposseqüência. Para efeito de armazenagem e facilidade no manuseio dos arquivos, utilizou-se para cada radargrama um volume máximo de 1,4 Mb.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características morfológicas

A descrição morfológica (Quadro 1) registra as principais propriedades dos perfis que podem ser relacionadas com a avaliação radargramétrica. A figura 1 mostra o perfil topográfico da área pesquisada com a locação dos perfis e tradagens.

O perfil P1 é descrito como um Argissolo Amarelo coeso latossólico, sendo a característica morfológica de maior relevância o horizonte coeso, que ocorre entre 50 e 70 cm de profundidade. Não foram observados fragipãs ou duripãs até à profundidade de 300 cm. É um perfil que caracteriza os solos intermediários entre os Latossolos Amarelos argilosos de montante e os solos podzolizados que, a partir desse perfil, passam a dominar a toposseqüência.

O perfil P2 é um Argissolo Amarelo coeso fragipânico, arenoso até à profundidade de 59 cm, com transição abrupta para o horizonte Bt1, onde também ocorre a coesão. Abaixo do horizonte coeso, aparecem faixas de acumulação de ferro na profundidade de 150 cm, com espessura milimétrica, descontínuas e difusas, sobre as quais ocorrem manchas claras, com caráter fragipânico, em pequenas porções.

O perfil P3 é um Argissolo Amarelo coeso fragipânico. Sobre uma linha de ferro em 180 cm ocorre um fragipã, mais espesso que o do perfil P2, variando em torno de 60 cm. A perda de ferro dessa porção é evidenciada pelo branqueamento do material.

O perfil P4 é um Espodossolo cárbico hiperespesso, composto por horizontes arenosos até 210 cm. Abaixo do horizonte E, ocorre um Bh espesso, que vai de 200 a 300 cm de profundidade, sem, no entanto, aparecer qualquer característica de horizonte frágico ou dúrico.

O perfil P5 é um Argissolo Acinzentado duripânico com horizontes arenosos sobre um horizonte franco-argilo-arenoso que ocorre entre 55 e 100 cm de profundidade. A partir dos 100 cm, ocorre um duripã, apresentando mosqueados avermelhados e amarelados.

O perfil P6 é um Latossolo Amarelo coeso, e o perfil P7 apresenta as mesmas características.

O perfil P8 é um Espodossolo duripânico, com horizonte E apresentando-se arenoso até os 110 cm de profundidade, onde faz transição de forma abrupta com um horizonte Bh, centimétrico, friável, sobre o duripã que ocorre em blocos, sobre uma linha de ferro difusa. Abaixo da linha de ferro, o duripã ultrapassa os 210 cm, bastante fraturado.

O perfil P9 também é um Espodossolo duripânico com horizonte E com 100 cm de espessura, sobre um duripã formado em blocos grandes, com coloração brunada e esbranquiçada.

Todos os horizontes (fragipã e duripã) descritos estão em processo de degradação, com fraturas entre os blocos e desenvolvimento de raízes, não provocando a retenção das águas.

Análise radargramétrica

Como o GPR capta as principais diferenças no comportamento dielétrico do solo, feições como os blocos de duripã e de fragipã oferecem boas condições de reflexão das ondas eletromagnéticas. As imagens obtidas pelo GPR, ou radargramas, mostram claramente os domínios dos solos com duripã (Espodossolo e Argissolo), que oferecem comportamento diferenciado quando comparado com o Latossolo, com o Argissolo ou com o Espodossolo sem as características fráguas/dúricas. Os solos transicionais sem a presença de horizontes endurecidos, como o Argissolo latossólico, não são

Quadro 1. Características morfológicas dos perfis

Horizonte	Profundidade cm	Cor úmida	Estrutura			Transição
			Grau	Tamanho	Forma	
P 1 – Argissolo Amarelo coeso latossólico Tb distrófico textura argilosa						
Ap	0-10	10 YR 4/3	moderado	médio	grumo	clara e plana
B/A	10-32	10 YR 5/8	moderado	pequeno	bl. subang.	clara e plana
Bt	32-70	10 YR 6/6	maciço			clara e plana
Bw	70-150+	10 YR 6/8	forte	m. pequeno	granular	
P 2 – Argissolo Amarelo coeso fragipânico Tb distrófico textura franco-argilosa						
Ap 1	0-5	10 YR 4/3	fraco	pequeno	grumo	clara e plana
Ap 2	5-15	10 YR 5/4	g. simples			clara e plana
E	15-59	10 YR 5/4	g. simples			clara e plana
Bt 1	59-110	10 YR 5/4	maciço			clara e plana
Bt 2	110-150	10 YR 7/6	fraco	m. pequeno	bl. subang.	clara e plana
Bt 3	150-210+	10 YR 6/6	fraco	m. pequeno	bl. subang.	
P 3 – Argissolo Amarelo fragipânico distrófico textura franca						
Ap 1	0-5	10 YR 6/4	fraco	médio	grumo	clara e plana
Ap 2	5-20	10 YR 4/3	fraco	médio	grumo	clara e plana
Bt 1	20-120	10 YR 6/4	maciço			clara e irreg.
Bt 2	120-180	10 YR 7/6	fraco	pequeno	bl. subang.	abrup. e irreg.
Bt 3	180-210+	10 YR 6/6	Forte	m. pequeno	granular	
P 4 – Espodossolo cárbico hiperespesso						
Ap	0-15	10 YR 4/1	fraco	médio	grumo	clara e plana
E 1	15-90	10 YR 6/4	g. simples			clara e plana
E 2	90-210	10 YR 5/3	g. simples			abrup. e plana
Bh	210-230+	10 YR 5/3	g. simples			
P 5 – Argissolo Acinzentado duripânico textura franco-argilosa						
Ap 1	0-10	10 R 4/2	fraco	médio	grumo	clara e plana
Ap 2	10-20	10 YR 4/3	fraco	pequeno	grumo	clara e plana
E	20-55	10 YR 5/4	fraco	m. pequeno	bl. subang.	clara e plana
Bt 1	55-100	10 YR 6/4	moderado	pequeno	bl. subang.	abrup. e plana
Btm	100-210+	7,5 YR 5/8	maciço			
P 6 – Latossolo Amarelo coeso Tb distrófico textura argilosa						
Ap 1	0-10	10 YR 4/3	moderado	médio e peq.	grumo	clara e plana
Ap 2	10-20	10 YR 4/3	moderado	pequeno	bl. subang.	clara e plana
B/A	20-80	10 YR 4/3	maciço			clara e plana
Bw1	80-190	10 YR 6/6	maciço			clara e plana
Bw2	190-210+	10 YR 5/8	forte	m. pequeno	granular	
P 7 – Latossolo Amarelo coeso Tb distrófico textura argilosa						
Ap	0-5	10 YR 3/3	forte	médio	grumo	clara e plana
B/A	5-22	10 YR 4/3	maciço			clara e plana
Bw 1	22-175	10 YR 5/8	maciço			clara e plana
Bw 2	175-210+	7,5 YR 5/8	moderado	m. pequeno	granular	
P 8 – Espodossolo duripânico						
Ap	0-10	10 YR 4/2	fraco	médio	grumo	clara e plana
E	10-110	10 YR 7/3	g. simples			abrup. e plana
Bh	110-120	10 YR 4/1	g. simples			
Btx	120-210+	variegada ⁽¹⁾	maciço			
P9 – Espodossolo duripânico						
Ap	0-10	10 YR 4/2	fraco	médio	grumo	clara e plana
E	10-120	10 YR 7/2	g. simples			clara e plana
Btx	120-200+	10 YR 6/3	maciço			

⁽¹⁾ 7,5 YR 5/8 e 10 YR 6/3. g. simples - grãos simples; peq. - pequeno; m. pequeno - muito pequeno; bl. subang. - bloco subangular; abrup. - abrupta; irreg. - irregular; méd. - médio.

diferenciados do Latossolo Amarelo. Embora apresentem teores de argila muito diferentes, sua distinção não foi captada pelo equipamento, provavelmente em razão da frequência utilizada, que não possibilitou maior detalhamento. Os padrões de reflexão das ondas eletromagnéticas de cada domínio podem ser analisados e suas características, depois de confrontadas com a morfologia, permitem a generalização sobre o restante da toposseqüência.

O radargrama, que cobre os perfis P2 e P3 e as tradagens T1 (Argissolo Amarelo fragipânico) e T2 (Espodossolo duripânico) (Figura 2), mostra a existência de um refletor forte na profundidade de

3,0 m (tempo aproximado de 60 ns), com uma “quebra” de continuidade que tem início na distância de 50 m, surgindo com suave inclinação ascendente até atingir 1,5 m de profundidade em 120 m, seguindo até o final do radargrama. A mudança nítida no padrão de reflexão ocorre na porção abaixo desse refletor, que vai de 40 m até o final (170 m) do radargrama, e está relacionada com a existência das camadas de duripã. Entre 0-40 m de distância, o padrão de reflexão indica material sem refletor forte, ou seja, não há fragipãs espessos ou duripãs até esse ponto, revelando um volume aparentemente homogêneo. O horizonte coeso, embora existente, não é perceptível no perfil radargramétrico.

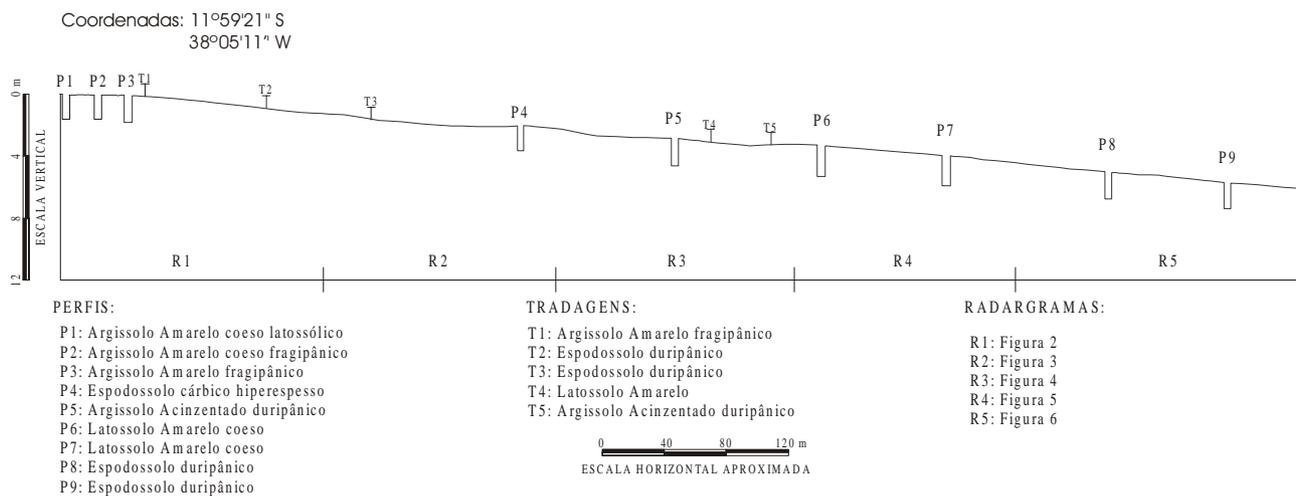


Figura 1. Toposseqüência esquemática de Entre Rios.

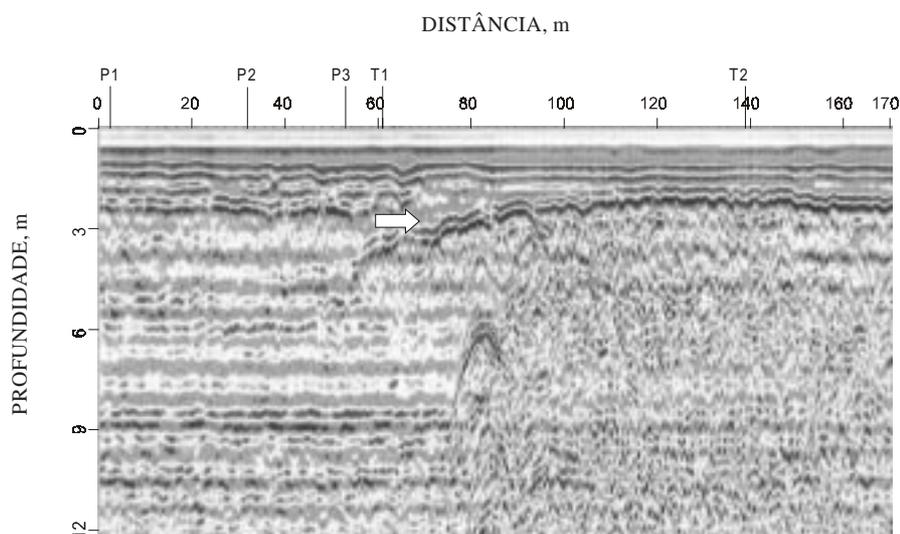


Figura 2. Radargrama - R1 mostrando Argissolo intergrade Latossolo entre a distância de 0-30 m e Argissolo Amarelo com fragipã entre 30-75 m. Após os 80 m, aparece o Espodossolo com duripã. A seta indica o início refletor forte (duripã). O perfil P2 está localizado em 32 m e o P3 em 53 m. As tradagens T1 e T2 estão localizadas em 61 e 139 m, respectivamente.

A diferença no padrão de reflexão exibido entre as distâncias de 0-40 e 40-170 m no mesmo radar-grama evidencia o domínio de duas porções de solos que mostram na presença da fragipã e do duripã o maior diferenciador: o Argissolo Amarelo coeso latossólico na primeira porção, o Argissolo Amarelo fragipânico e o Espodossolo duripânico na segunda e maior porção, recobrendo a maior parte da figura 2.

Abaixo do refletor, são observadas linhas de difração em forma de “Vs” invertidos, em consequência das fraturas e da geometria do refletor (fragipã e duripã) que afetam a passagem das ondas para as partes mais profundas. O duripã não aparece de forma contínua, e mesmo quando apresenta grande espessura, dependendo de seu estágio de degradação mostra um sistema de fraturas preenchidas por material friável, por onde as raízes penetram. Essa característica propicia as inflexões das ondas

eletromagnéticas emitidas pelo radar e contribui para uma menor resolução das imagens obtidas.

A figura 3 mostra o Espodossolo com duripã espesso e profundo (tradagem T3, em 207 m) transicionando para um Espodossolo sem duripã, que inicia em 290 m e se estende até os 310 m. O refletor típico das camadas de duripã cessa de forma abrupta, num mergulho vertical de aproximadamente 60 cm num espaço de 8 m, reaparecendo após 20 m, voltando a exibir o padrão do duripã.

Na figura 4, em 400 m, aparece o Argissolo Acinzentado com duripã (perfil P5) e, 14 m a jusante, o domínio já pertence ao Latossolo Amarelo sem horizontes endurecidos em profundidade (tradagem T4 em 420 m), o que caracteriza essas áreas de transição como zonas estreitas, dificultando a identificação dos vários tipos de solos que se superpõem.

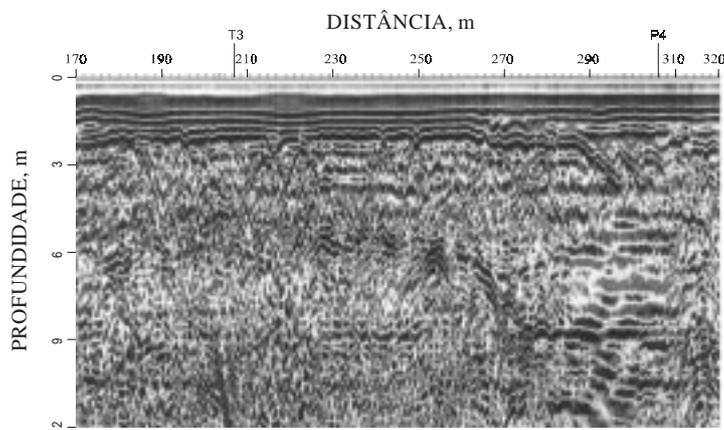


Figura 3. Radargrama - R3 mostrando Espodossolo com duripã entre as distâncias de 170-285 m e Espodossolo sem presença de pã entre 285-310 m. Perfil P4 localizado em 306 m. Tradagem T3 localizada em 207 m.

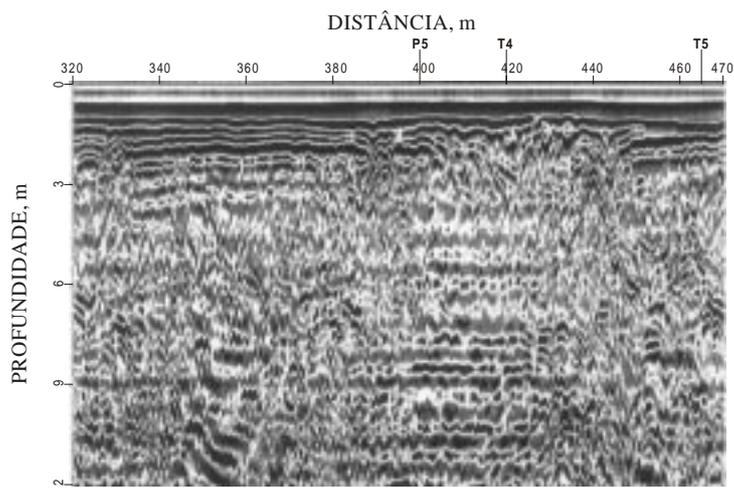


Figura 4. Radargrama - R3 mostrando sistema complexo de passagem de solos do tipo Espodossolo com duripã (320-346 m) para Espodossolo com pã muito degradado (346-364 m), gradando para um Argissolo Acinzentado com pã (P5 em 400 m) e para um Latossolo Amarelo entre 400-428 m (tradagem T4 em 420 m). A área entre 428-450 m volta a apresentar padrão de Argissolo Acinzentado sem pã e a partir de 450 m volta o refletor forte, mostrando o domínio do Argissolo Acinzentado com duripã (tradagem T5 em 465 m).

Após o Latossolo Amarelo, observa-se que volta o Argissolo Acinzentado, que vai de 428 a 450 m sem horizonte endurecido espesso e segue com a presença do duripã até os 470 m finais do radargrama. Na figura 5, esse padrão ainda permanece no seu início, passando para o domínio do Latossolo Amarelo (perfis P6 e P7), que se estende de 478 m até os 610 m finais. Esse padrão segue até os 635 m da figura 6, onde transiciona para um Espodossolo com duripã (perfis P8 e P9), voltando a exibir o padrão do Latossolo na porção final do radargrama.

CONCLUSÕES

1. A investigação da subsuperfície do solo por meio do GPR mostrou resultados muito interessantes, permitindo a sua visualização de forma contínua ao longo da vertente.

2. As informações radargramétricas mostraram-se adequadas para o aprofundamento na pesquisa da gênese e das transformações dos solos dentro da análise integrada da toposseqüência. Além de

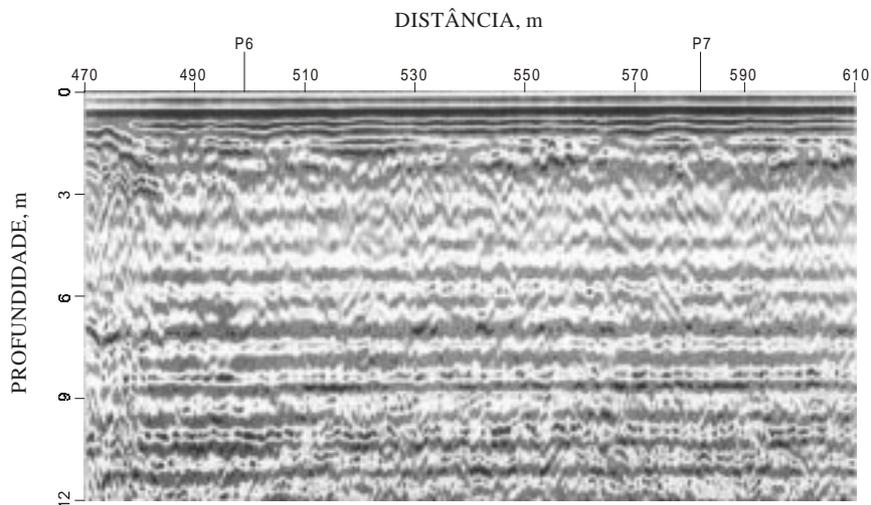


Figura 5. Radargrama - R4 mostrando o final do domínio do Argissolo Acinzentado (470-478 m) passando para o domínio do Latossolo Amarelo. Os perfis P6 e P7 estão localizados nas distâncias de 449 e 582 m, respectivamente.

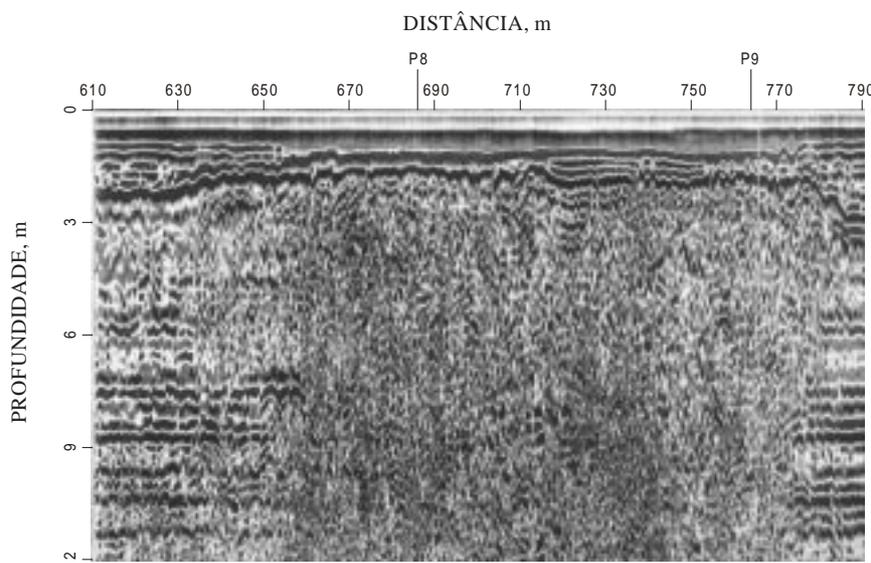


Figura 6. Radargrama - R5 mostrando o retorno do Espodossolo com fragipã e duripã (áreas mais escuras no centro da figura) e do Espodossolo com duripã (entre 744-778 m). As margens esquerda e direita do radargrama mostram o domínio dos Latossolos. Os perfis P8 e P9 estão localizados em 686 e 764 m, respectivamente.

reduzir os custos e o tempo necessário para uma avaliação desse porte, possibilitaram comparar não só as formas exibidas pelos perfis (testemunhas), mas também as transições entre os tipos de solos.

3. Para obter maior resolução radargramétrica das camadas mais superficiais, até 100 cm de profundidade, bem como maior resolução das imagens sobre as passagens entre os horizontes/camadas subsuperficiais, a frequência das antenas utilizada nesta pesquisa não se mostrou adequada, sendo necessários mais dois conjuntos de antenas com frequências entre 400 e 900 MHz para uma pesquisa que objetive o recobrimento de todas as características do solo.

4. De forma geral, as diferenças mais perceptíveis nos radargramas mostraram-se relacionadas com a presença ou com a ausência de refletores fortes, representados nesta pesquisa pelos horizontes de duripã e de fragipã, que, por sua vez, mostraram-se relacionados com os processos de formação dos Argissolos e dos Espodossolos.

AGRADECIMENTOS

À Copener Florestal Ltda, pelo apoio e total cooperação.

LITERATURA CITADA

- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geoph. Prosp.*, 37:531-551, 1989.
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de coleta e descrição de solo no campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.
- RIBEIRO, L.P. Os Latossolos Amarelos do Recôncavo baiano: gênese, evolução e degradação. Salvador, FAPEX, 1998. 99p.
- TOMER, M.D.; BOLL, J.; KUNG, K.J.S.; STEENHIUS, T. & ANDERSON, J.L. Detecting illuvial lamellae in fine sand using ground-penetrating radar. *Soil Sci.*, 161:121-129, 1996.
- VILAS BOAS, G.S. Sedimentos terciários. In: BARBOSA, J.S.F. & DOMINGUEZ, J.M.L., eds. Mapa Geológico do estado da Bahia - texto explicativo. Salvador, Secretária de Minas e Energia do Estado da Bahia/SGM, 1996. p.165-167.