

MUDANÇAS NAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO ASSOCIADAS A DIFERENTES ESTÁGIOS DE SUCESSÃO ECOLÓGICA

Data de aceite: 13/03/2023

Maria Fernanda Affonso Penna

Área de Saúde Ambiental, Fiocruz Mata Atlântica, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Nelson Ferreira Fernandes

Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Nilson Rendeiro Pereira

Embrapa Solos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

RESUMO: Solos florestais são influenciados pela vegetação em sua formação. Entretanto, a influência da vegetação e seu estágio de sucessão ecológica em relação às propriedades químicas e físicas do solo ainda são pouco compreendidos. Assim, este estudo avaliou aspectos das propriedades físicas (granulometria e condutividade hidráulica) e químicas de solos (pH, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺, C, N e P) em fragmentos com formação vegetal de idades distintas (9 e 60 anos) na Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica. Os resultados permitem inferir que quando o trecho florestal amadurece com o

crescimento dos indivíduos arbóreos, há aumento na propriedade de condutividade hidráulica, assim como nas propriedades químicas C orgânico, N e P assimilável, nas camadas mais rasas. Esses resultados corroboram a importância da restauração ecológica para a recuperação do ecossistema florestal e seus serviços ecossistêmicos, compreendendo que o grau de sucessão ecológica influencia na estrutura e composição do solo.

INTRODUÇÃO

Vários processos e mecanismos superficiais (e.g., escoamento superficial, infiltração, erosão), assim como propriedades dos materiais (e.g., qualidade da água e do solo), são regulados através de mecanismos de *feedback* entre água-vegetação-solo. O tipo, densidade e grau de desenvolvimento da vegetação assumem papel relevante nessas interações, influenciando em diversos processos hidropedológicos, dentre eles infiltração, escoamento e evapotranspiração (HILLEL, 1998; REICHARDT, 2004; THOMPSON *et al.*, 2012; BRADY; WEIL, 2012). Dentro dos

ambientes florestais, vários estudos já foram realizados em climas temperados, semiáridos e áridos, definindo as principais interações vegetação-água-solo em ambientes naturais (ARCHER *et al.*, 2016; GERIS *et al.*, 2015; TALKNER *et al.*, 2010). Apesar de incipiente, estudos em florestas tropicais que correlacionam vegetação-água-solo começam a emergir, investigando um ecossistema com altas taxas de precipitação e radiação solar, somadas à alta riqueza de biodiversidade (LOZANO-BAEZ *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2020), ou seja, ambientes de grande complexidade.

Em relação à influência da vegetação nas propriedades químicas dos solos, destacamos o acúmulo de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes, que fazem com que os valores de carbono orgânico, fósforo e pH sejam alterados na presença de florestas (CHEN *et al.*, 2020). Os nutrientes advindos da ciclagem de nutrientes podem ser oriundos, além da própria produção e decomposição da serapilheira, da transferência de elementos acumulados no dossel que escorrem através da precipitação pelos troncos e folhas (SIOLI, 1985). A presença da vegetação pode ser determinante na alteração das propriedades químicas do solo, geralmente apontando para uma relação positiva entre nitrogênio, carbono e fósforo e os estágios de sucessão da vegetação (ZHAO *et al.*, 2015; HUANG *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2020). Ao comparar florestas em recuperação com florestas muito antigas, há acúmulo significativamente maior desses nutrientes nas áreas de florestas antigas (HUANG *et al.*, 2018). A presença de nitrogênio, fósforo e carbono, além da distribuição da água no solo, influenciam no desenvolvimento da sucessão e nas diferentes distribuições de espécies florestais, reforçando a hipótese de que os mecanismos “planta” e “solo” ocorrem de forma sinérgica (ALDAY *et al.*, 2012).

A estrutura é uma das propriedades físicas mais importantes do solo, sendo resultante da junção de diversos agregados. A história de evolução de um determinado solo, principalmente em termos de uso e cobertura, influencia nos valores observados de algumas de suas propriedades físicas, especialmente a condutividade hidráulica. Essa propriedade que expressa a relação entre carga e velocidade que a água perpassa no solo é influenciada por atributos físicos como porosidade e densidade global de um solo. Essas propriedades são fundamentais nos estudos de hidrologia florestal, já que podem sofrer alterações em menor temporalidade, decorrentes de modificações no uso ou manejo ao qual o solo está exposto. Além disso, essas propriedades influenciam no desenvolvimento do sistema radicular, na atividade microbiana e deficiência nutricional, na erosão hídrica, assim como na drenagem interna dos solos (HILLEL, 1998).

Estudos relacionados ao comportamento da condutividade hidráulica por parte das pesquisas em ambientes florestais demonstram que a regeneração (ZIMMERMANN *et al.*, 2006; HASSLER *et al.*, 2011) e restauração ecológica de uma área podem ser responsáveis pelo aumento da condutividade hidráulica saturada na superfície do perfil de solo (FILOSO *et al.*, 2017). Mesmo sendo uma propriedade do solo com grande variabilidade espacial e temporal (CHEN *et al.*, 2020), a condutividade hidráulica é um indicador eficiente para

identificar os efeitos decorrentes de mudanças de cobertura da terra na dinâmica hidrofísica do solo.

A Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica (EFMA) - localizada na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro e parcialmente sobreposta ao Parque Estadual da Pedra Branca (PEPB) - possui áreas de replantio, regeneração e enriquecimento. O histórico de ocupação da área se destaca pelas monoculturas de cana e café no final do século XIX, além da retirada de lenha para carvão, principalmente de 1940 a 1950. Após o declínio do potencial agrícola, essas atividades foram sendo abandonadas, o que favoreceu a regeneração espontânea da floresta (SOLÓRZANO; RIBEIRO *et al.*, 2010). Especificamente em nossas parcelas de estudo, a EFMA conta com diversos projetos de restauração ecológica que têm o intuito de restabelecer o ecossistema florestal que vigorava antes dos ciclos agrícolas. Todo esse histórico de ocupação propicia diferentes formações florestais, decorrentes dos diversos estágios de sucessão ecológica. Os diferentes estágios escolhidos, então, para o desenvolvimento da presente pesquisa foram: estágio primário (EP) e estágio secundário (ES) de sucessão ecológica.

O estudo teve como principal objetivo caracterizar a vegetação e o solo de áreas em estágios sucessionais distintos, visando a compreender as relações existentes entre eles. Para tal, esta pesquisa combinou estudos de descrição fitofisionômica com análises das propriedades físicas e químicas do solo, envolvendo, também, a realização de ensaios de campo visando à determinação da condutividade hidráulica *in situ*. Este estudo constituiu-se em uma das primeiras contribuições que visam a avaliar a relação entre vegetação e propriedades químicas e físicas do solo em Mata Atlântica, na fitofisionomia Ombrófila Densa.

METODOLOGIA

Seleção das áreas amostradas e geração dos modelos digitais de elevação

A Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica (EFMA; Figura 1) está localizada no domínio fitofisiográfico da Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2012). O clima da região é classificado como tropical úmido, do tipo Af, de acordo com o sistema de Köppen-Geiger (1900), adaptado por Setzer (1966). A média anual da temperatura é de 26 °C e a precipitação média anual é de 1.187 mm, não sendo homogênea e estando exposta a variações sazonais, com os meses de julho a outubro mais secos, quando a média da precipitação cai para 880–970 mm nesse período (SMAC, 2000).

Dentro da EFMA, selecionamos duas áreas seguindo dois critérios: (1) vegetação em estágios sucessionais distintos; e (2) mínima variação ambiental (topográficas, pedológicas e geológicas). Esse segundo critério foi estabelecido para garantir que fosse, de fato, observada a questão de interesse desta pesquisa, de que forma a sucessão ecológica influenciava nas propriedades hidrofísicas do solo.

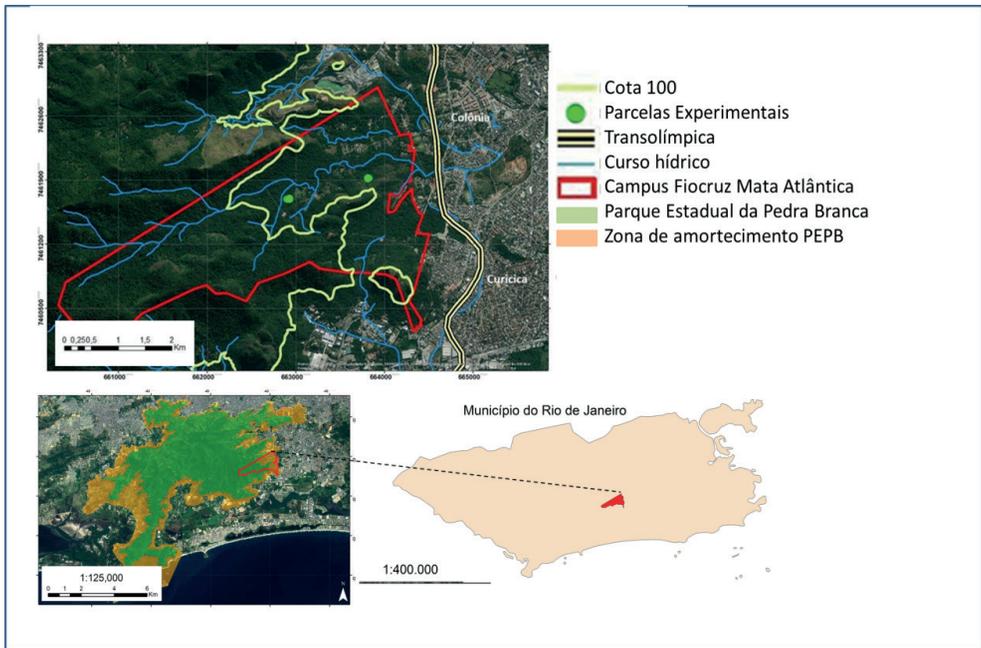


Figura 1. Mapa de localização das parcelas dentro da Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica, e localização do Campus Fiocruz Mata Atlântica em relação ao PEPB e ao município do Rio de Janeiro.

Ano: 2019.

As duas áreas possuem históricos de perturbação distintos, sendo que uma está há mais tempo isolada de ações humanas do que a outra. A primeira área selecionada aparenta estágio pioneiro (EP; Figura 02), mostrando, ainda, constantes intervenções humanas e sinais de recuperação ativa, com plantios de mudas oriundas das medidas compensatórias destinadas à Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Cultura (SMAC), algumas rebrotas, principalmente das espécies presentes no plantio e diversas gramíneas. Os primeiros indivíduos plantados possuem aproximadamente nove anos e são parte do projeto Mutirão de Reflorestamento, programa de reflorestamento do município do Rio de Janeiro.

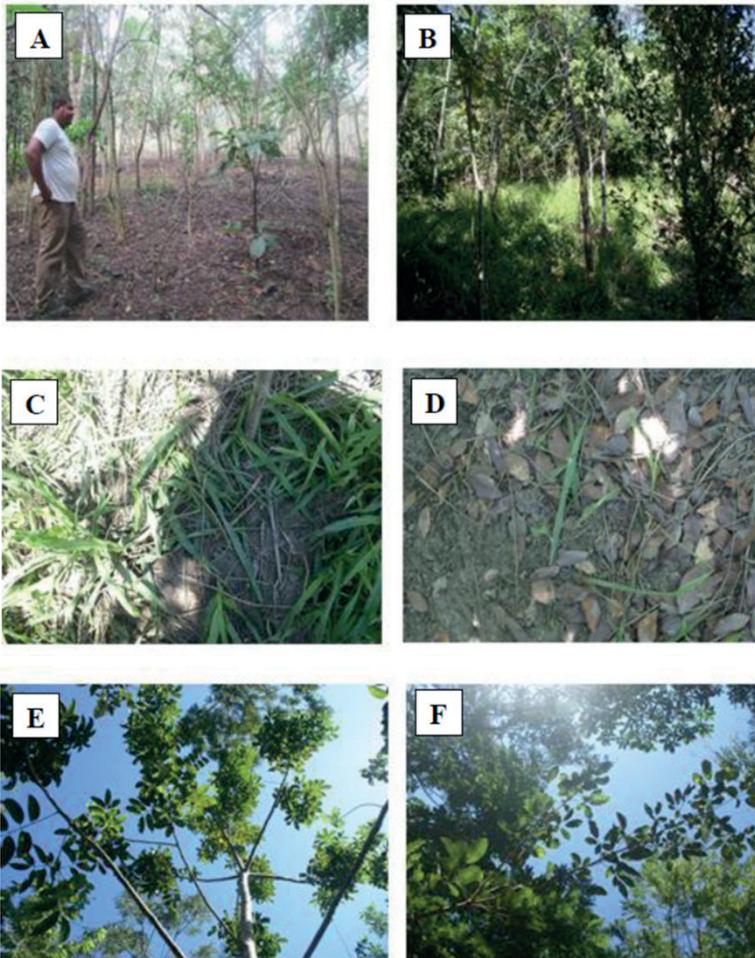


Figura 2. Fotos da EP caracterização da vegetação: (A) e (B) sub-bosque, (C) e (D) cobertura do solo e serapilheira e (E) e (D) dossel e abertura de copa. Ano: 2019.

A segunda área selecionada encontra-se mais isolada, não sofrendo, de acordo com relatos locais, perturbação antrópica direta há aproximadamente 60 anos. Essa área atualmente compreende uma floresta fisionomicamente estruturada e que consideramos como área da floresta em estágio secundário (ES; Figura 03). A área abriga diversas atividades de pesquisa com enfoque em Restauração Ecológica e na interface entre biodiversidade e saúde, e conta com alguns trechos de plantio para enriquecimento.

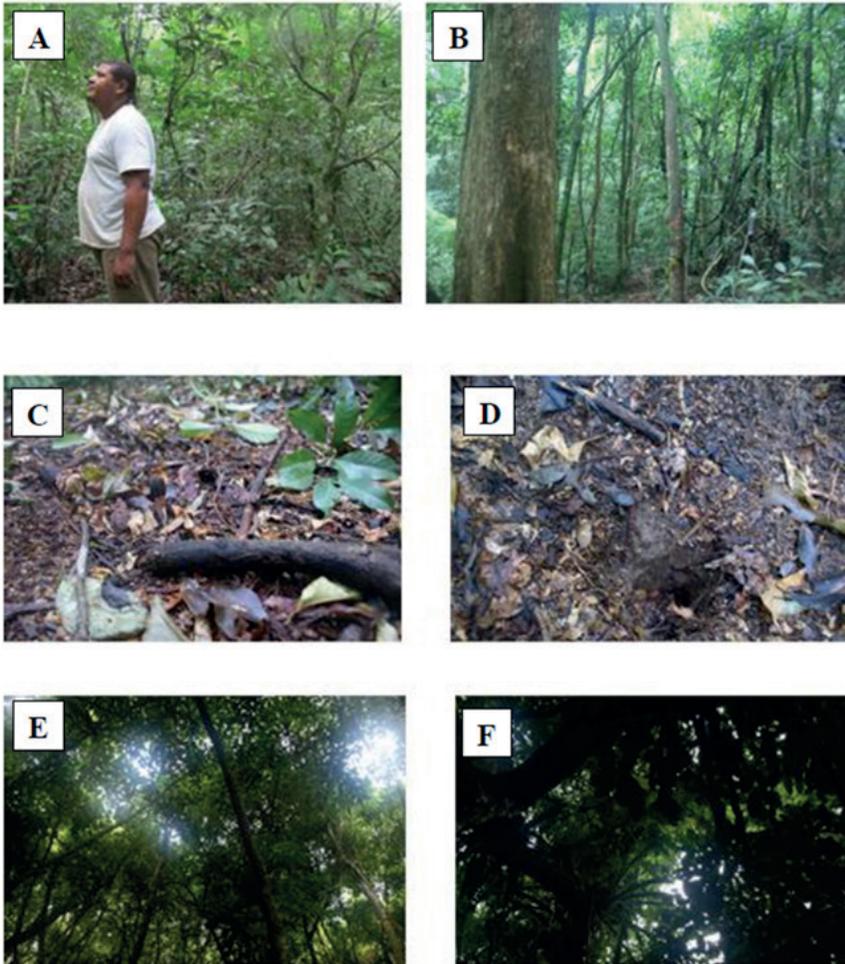
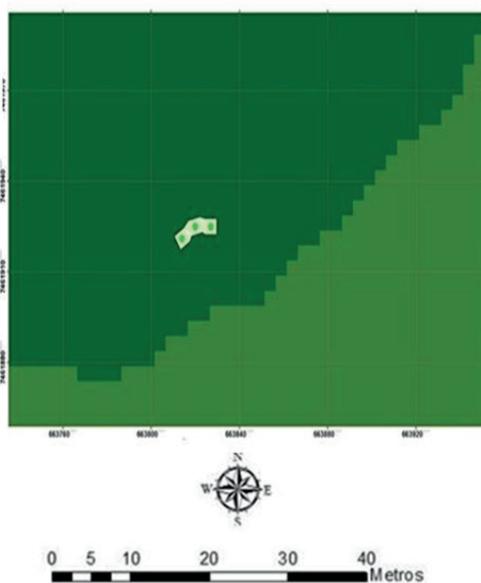


Figura 3. Fotos da EP caracterização da vegetação: (A) e (B) sub-bosque, (C) e (D) cobertura do solo e serapilheira e (E) e (D) dossel e abertura de copa. Ano:2019.

Geramos o modelo digital de elevação (MDE) no formato GRID, com resolução espacial de 5 m a partir da Base Cartográfica Vetorial Contínua do Estado do Rio de Janeiro, na escala 1:25.000. Esse modelo foi gerado no software Arc Map 10.3. A partir da geração desses mapas pudemos escolher áreas que tivessem inclinação semelhante, definindo a EP com declividade de 16 e a ES com 14 graus. Ambas as áreas foram mantidas na cota 40.

Parcela Experimental – Área pioneira (AP)



Parcela Experimental – Área secundária (AS)

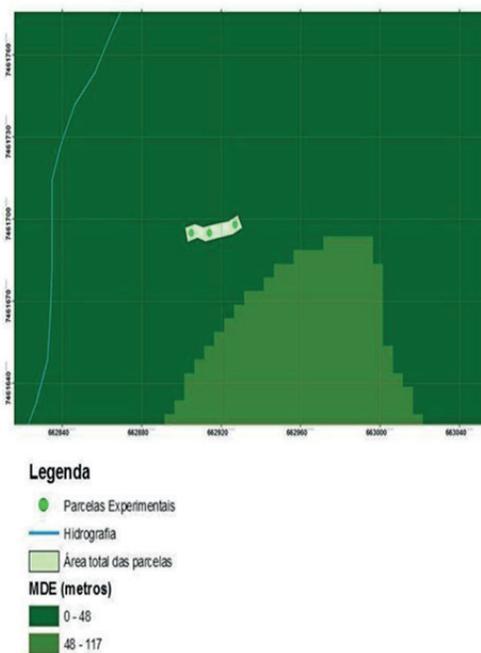


Figura 4. Parcelas EP e ES e suas cotas altimétricas a partir do modelo de elevação e curso hídrico. Ano: 2019.

Levantamento e classificação do solo

Para fazer a análise das propriedades do solo foi aberta, em cada área, uma

trincheira para a descrição do perfil do solo por área. Cada trincheira tinha ca. 1,25 m de profundidade. Foram feitas a descrição por horizonte; designação por camada; profundidade; cor, utilizando o nome e notação de Munsell, se a cor é com mosqueados ou variegada; granulometria e textura; estrutura; cerosidade, superfície de fricção; superfície de compressão; superfícies foscas; grau de coesão; consistência seca; cimentação; consistência úmida e molhada; e variação de espessura do horizonte quando a transição não for plana (IBGE, 2007). Além disso, foram observados presença de raízes, atividade de fauna, declive, cobertura vegetal e material de origem.

Coleta de amostras e análise das propriedades físicas do solo

Em cada um dos perfis abertos foi possível observar e descrever os horizontes do solo e coletar amostras deformadas, sendo três amostras por horizonte do solo. As trincheiras foram abertas em degrau com auxílio de enxadas, enxadões e pás de terra para facilitar o trabalho de classificação do solo, estando localizadas no terço inferior de encosta, sob áreas com diferentes coberturas florestais.

As amostras coletadas foram encaminhadas para a Embrapa Solos para análises químicas e físicas. As composições físicas selecionadas foram: quantificação das frações terra fina, cascalho e calhaus presentes na amostra original através da pesagem de cada uma dessas frações. Para as análises químicas foram analisados o pH; Ca^2 , Mg^2 , K, Al^3 e H (complexo sortivo); N, P assimilável e C orgânico. A soma das bases (complexo sortivo) + a acidez potencial (N, P assimilável e C orgânico) é conhecida como a CTC efetiva. Os métodos utilizados para a obtenção dos resultados estão disponíveis no Manual de métodos de análise de solo (2017).

Medição da condutividade hidráulica em campo

Para a medição da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) *in situ* foi utilizado o Permeâmetro modelo IAC, desenvolvido com embasamento no Permeâmetro de Guelph por Sidney Vieira (1995–1998). No centro de cada subparcela foram escavados três furos de 10 cm de diâmetro nas profundidades de 15 cm e 40 cm, dispostos aleatoriamente dentro de cada parcela. Para estatística, foram realizadas três repetições em cada teste, resultando em um total de 36 ensaios de condutividade (Figura 4). As leituras da taxa de fluxo (cm/s) foram realizadas, em leituras regulares, no nível d'água através do reservatório graduado. Cada ensaio teve a duração de 30 a 60 minutos, dependendo das condições do solo, tendo sido a condição de *steady-state* definida quando três medições consecutivas iguais foram obtidas.

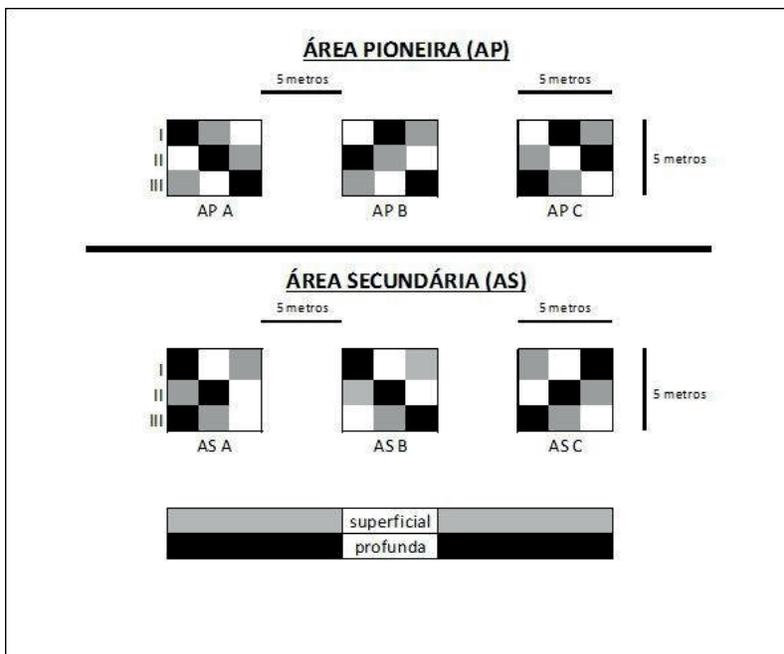


Figura 5. Delineamento amostral das parcelas para o ensaio e medição da condutividade hidráulica saturada em diferentes profundidades. Ano: 2019.

O procedimento aqui utilizado para a medição da condutividade hidráulica baseia-se na premissa do permeâmetro de carga constante, com carga hidráulica constante de 10 cm. Foi utilizada posteriormente a equação de Elrich *et al.* (1989), descrita abaixo, sendo obtidos os valores de K_{sat} em cm/s, onde: K_{sat} = Condutividade Hidráulica saturada (cm/s); C = constante de proporcionalidade adimensional; Q = vazão constante (cm³/s); a = raio do furo (cm); H = Carga constante aplicada (cm); α = parâmetro de correção do meio poroso (cm/s).

$$K_{sat} = CQ \div [2\pi H^2 + C\pi a^2 + (2\pi \div \alpha)]$$

Assim, é possível detectar o padrão de variação local da condutividade hidráulica (K_{sat}) tanto a partir do seu comportamento médio (média aritmética) quanto da sua variabilidade, a partir do coeficiente de variação.

Avaliação da estrutura da vegetação

Com a finalidade de dimensionar as características da vegetação das áreas estudadas, foram mensuradas em todos os indivíduos arbóreos as circunferências dos troncos a 1,30 m do solo (CAP), tendo sido anotados aqueles com CAP com perímetro maior ou igual a 15 cm. Esse critério foi adotado a fim de definir os indivíduos considerados

adultos em florestas do bioma Mata Atlântica (CAIAFA, 2007; MARTINS, 2007; MORO; MARTINS, 2011). Os indivíduos foram identificados até espécie e foram mensuradas a altura (estimativa da distância do topo da copa até o solo), a cobertura de copa e a circunferência dos troncos. Foi calculada área basal, que expressa a ocupação em termos de área e a densidade de indivíduos por m². No centro de cada parcela, foi mensurado o grau de abertura da copa das árvores (%; Abertura De Copa) através do aplicativo para smartphones GLAMA “Gap Light Analyser Mobile App”. A diversidade de espécies foi avaliada pelo índice de Shannon (H’).

RESULTADOS

Características pedológicas

Os solos de ambas as áreas foram classificados como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (SBCS, 2015). A diferença entre as áreas se dá no 5º nível categórico, onde em EP o solo é plintossólico e em ES é cambissólico (SBCS, 2015). Em ambas as áreas se observou a presença de minerais pouco intemperizados como mica e feldspato, minerais muito presentes nos granitos e gnaisses da região.

No perfil da EP foram classificados quatro horizontes, nos quais os horizontes mais superficiais (A e BA) apresentavam textura franco-arenosa, passando para uma granulometria mais argilosa nos horizontes subjacentes (Btg1 e Btg2). Os resultados referentes à granulometria mostram que na área EP ocorre um acréscimo de 40% no teor de argila do horizonte AB para o Bt1, enquanto os teores de silte, areia fina e areia grossa têm um pequeno decréscimo, respectivamente de 10%, 18% e 20%. Nos horizontes Btg1 e Btg2 do perfil foi observada a coloração variegada, vermelho-amarelado e bruno-acinzentada típica em horizontes plínticos, formada pela restrição à percolação de água. Nesse perfil foi encontrada a presença abundante de raízes finas no horizonte A, sendo encontradas raízes finas por todo horizonte de forma mais esparsa. Em relação à atividade edáfica, foi detectada a presença de cigarras a cerca de 30 cm da superfície.

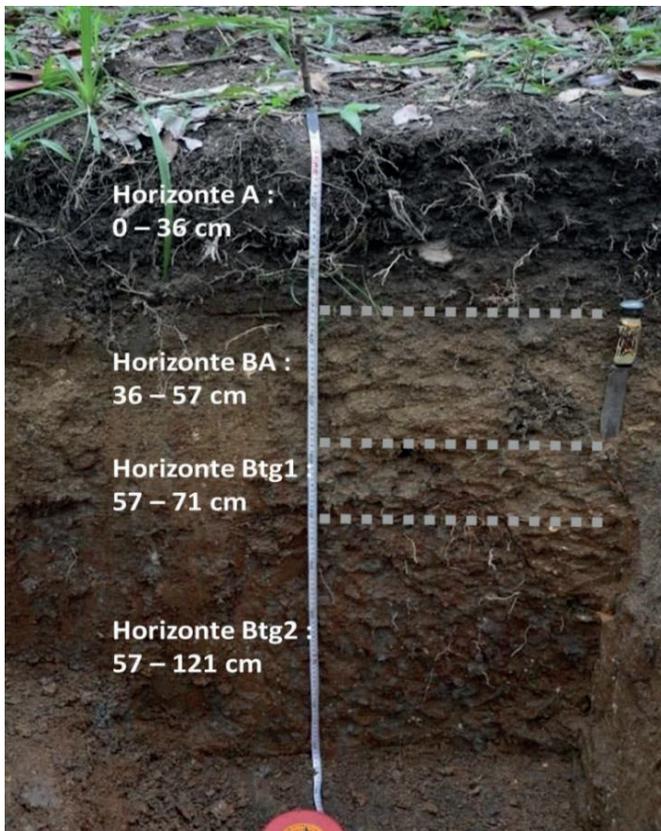


Figura 6. Perfil do solo da área EP, classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto plintossólico. Ocorre aqui cobertura de herbáceas e observa-se a presença de raízes finas ao longo de todo perfil e sua coloração é variegada nos horizontes (Btg1 e Btg2). Ano: 2019.

No perfil de solo da área ES (Figura 7) foram classificados quatro horizontes e descritas as características morfológicas e atividades edáficas. Destaca-se aqui que o perfil é composto pelo horizonte superior A, seguido de um horizonte com maior presença de argila, classificado como um típico horizonte Bt (B textural), definido pelo enriquecimento de argila em relação ao horizonte superior (Horizonte A). Subsequente ao horizonte Bt seguem os horizontes BC e C, nos quais se notou forte presença de minerais primários como mica e feldspato. A composição granulométrica da área ES apresenta um aumento de 60% no teor de argila do horizonte A para o horizonte Bt. A partir de BC ocorre uma queda de 11% no teor de argila na passagem para o horizonte C. No entanto, por se tratar de uma pequena redução, o solo ainda se mantém significativamente argiloso, mesmo em maiores profundidades. Sobre os demais teores da composição granulométrica, vemos um decréscimo de 42% no teor de areia grossa do horizonte A para o Bt, também ocorreu decréscimo de 37% no teor de areia fina na transição de BC para o Bt. As granulometrias de areia grossa e fina assim com silte passam a ter acréscimo, no entanto esses acréscimos

não passam de 20%. Em relação à matiz, destaca-se um horizonte C de coloração variegada composta de vermelho-amarelado refletindo a oscilação na drenagem. Em relação à presença de raízes, esse perfil apresenta raízes finas e medianas nos horizontes A e Bt, e, de forma menos densa, raízes medianas nos horizontes BC e C. Sobre a atividade edáfica, essa área possui forte presença de fauna na superfície do solo, como: minhocas, formigas e cupins.

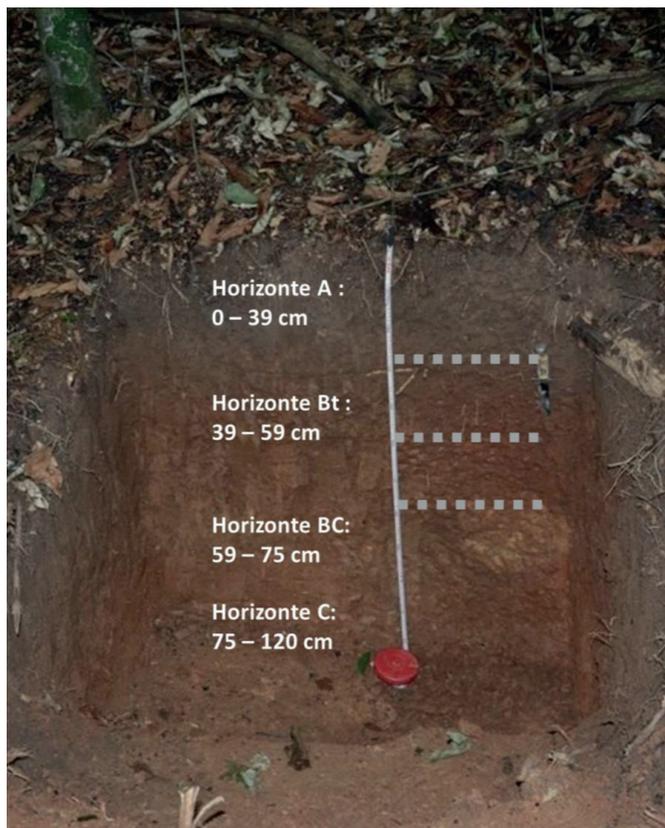


Figura 7. Perfil do solo de EP, classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto cambissólico. No perfil vemos que o solo do entorno apresenta densa cobertura de serapilheira e durante o perfil presença de raízes finas e medianas. Fonte: Ano: 2019.

Propriedades físicas e químicas dos solos

A Tabela 1 apresenta, para cada horizonte do perfil de solo das duas áreas estudadas, os resultados obtidos para granulometria, grau de floculação, pH, complexo sortivo, fósforo assimilável, carbono orgânico e nitrogênio. Esses resultados mostram que o solo da área ES possui maiores valores de grau de floculação, nitrogênio, fósforo assimilável e carbono orgânico. Essa diferença é observada nos primeiros horizontes, e valores mais baixos e pH por todo o perfil. Em relação aos elementos constituintes do complexo sortivo, não foi observado um padrão na diferença entre as duas áreas estudadas.

Tabela 1. Atributos químicos do complexo sortivo, fósforo assimilável, carbono orgânico e nitrogênio total das áreas EP e ES por horizontes, e composição granulométrica.

Área	Horizonte	pH (1:2,5)	Complexo Sortivo cmol _c kg ⁻¹										P assf- mlável mg kg ⁻¹	C (orgâ- nico) g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	Frações da amostra total			Composição granulométrica da terra fina g kg ⁻¹				
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S (soma)	Al ³⁺	H ⁺	Valor T	Calhaus >20 mm	Cas- calho 20-2 mm				Terra fina <2 mm	Areia grossa 2,0-20 mm	Areia fina 0,20-0,05 mm	Silte 0,05-0,002 mm	Argila < 0,002 mm	Argila disper- sa em água g kg ⁻¹		
Estágio Primário (EP)	A	4,8	0,8	1,3	0,12	0,04	2,3	0,5	4,0	6,8	3	9,4	0,9	0	109	891	482	218	159	141	121		
	AB	5,1	0,4	1,3	0,07	0,06	1,8	0,8	2,9	5,5	1	3,3	0,5	0	161	839	504	169	146	181			
	Bt1	5,5	0,6	1,8	0,08	0,37	2,8	2,5	1,9	7,2	1	3,3	0,6	0	99	901	336	116	120	428	0		
	Bt2	5,5	0,5	2,9	0,08	0,06	3,5	2,1	3,3	8,9	1	5,2	0,8	0	16	984	143	43	70	744	0		
Estágio Secundária (EP)	A	4,4	1,4	1,0	0,26	0,05	2,7	0,9	5,2	8,8	7	15,8	1,8	0	53	947	476	130	171	223	203		
	Bt	4,2	0,1	1,2	0,41	0,04	1,7	3,5	2,9	8,1	1	5,6	0,9	0	39	961	192	60	130	618	0		
	BC	4,3	0,1	2,0	0,25	0,05	2,4	2,8	3,2	8,4	1	3,9	0,6	0	48	952	212	80	173	535	0		
	C	4,3	0,1	1,8	0,14	0,05	2,1	2,9	2,8	7,8	1	2,5	0,4	0	36	964	248	115	207	430	0		

Condutividade hidráulica

A Tabela 02 apresenta os resultados de condutividade hidráulica do solo nas profundidades de 15 cm e 40 cm de profundidade (com a média, desvio padrão e coeficiente de variação [CV]), com três réplicas para cada parcela e para cada profundidade escolhida. Os resultados de condutividade hidráulica apresentam maiores diferenças quando interpretados por suas profundidades, tanto em EP quanto em ES a um acréscimo de 55% na média da K_{sat} de 15 cm se comparado com a K_{sat} média nos 40 cm de profundidade.

Tabela 2. Condutividade hidráulica média de EP e ES, desvio padrão e coeficiente de variação nas profundidades de 15 cm e 40 cm, teste f e teste p dos resultados dos ensaios de condutividade.

Profundidade	Área	Condutividade hidráulica mm/h	Desvio padrão mm/h	Coefficiente de variação %
15 cm	EP	162.9 (n=9)	124.18	76.6
	ES	179.03	97.2	53.7
	valor-f	0.106		
	valor-p	0.75		
40 cm	EP	46.54 (n=9)	28.8	61.1
	ES	51.02 (n=9)	25.2	51.7
	valor-f	0.12		
	valor-p	0.73		

Estrutura da vegetação arbórea

Na área EP os resultados médios são 21,03 cm de CAP médio (circunferência a altura do peito) e dossel de 5,3 m. Em relação às espécies, existe a predominância de *Machaerium hirtum*, *Inga laurina* e *Schinus terebinthifolia*, o levantamento aponta a presença de três famílias, sendo Fabaceae a família com maior quantidade de indivíduos, o índice de diversidade de Shannon-Wheaver é 1,52 nats/ind. Já na área ES os resultados médios mostram 39,01 cm de CAP e 15,7 de dossel. Em relação às espécies, por sua vez, predominam *Coussarea* sp. e *Sparattosperma leucanthum*, com uma diversidade de 1,88 nats/ind, estando presentes oito famílias, sendo a Rubiaceae a que possui a maior quantidade de indivíduos. Outros importantes resultados da estrutura da vegetação são riqueza e densidade, que apresentam acréscimos no ES em comparação ao EP, já a abertura de copa é reduzida do EP para o ES. Sendo um acréscimo de 50% na riqueza de espécies e de 100% na densidade arbórea, a abertura de copa é maior na área EP do que em ES (Tabela 03).

Tabela 3. Características média da estrutura da vegetação, riqueza, densidade, área basal, abertura de copa e índice de diversidade (H').

Estrutura da vegetação						
Área	Nº de parcelas	Riqueza (nº de espécies)	Densidade (ind/hectare)	Área basal (m ² /hectare)	Abertura de copa (%)	H' (ind/nats)
EP	3	3.3	1733	2	34.2	1
ES	3	6	4133	20.5	11.4	1.48
valor-F		19.69	64.8	111.2	7.3	8.6
valor-p		<0.001	<0.001	<0.001	<0.02	0.01

DISCUSSÃO

Aspectos pedológicos e da estrutura da vegetação nos trechos de diferentes estágios de sucessão

Nossos resultados indicam que a textura de ambos os solos apresenta valores semelhantes, dobrando em teor de argila do horizonte A para o horizonte subjacente, característica típica dos Argissolos. Embora a textura seja um importante fator controlador da dinâmica água-solo, esta pode não ter correlação direta com o conteúdo de água no solo (TALKNER *et al.*, 2010). A presença tanto de materiais de origens similares quanto de solos com texturas próximas pode explicar a proximidade nos padrões de condutividade hidráulica observados. Dessa forma, a permeabilidade do solo teria a pedogênese como aspecto preponderante na sua regulação. No entanto, apesar dos valores serem próximos, a média permanece maior na área ES tanto para a condutividade hidráulica quanto para a matéria orgânica, diferenciando os perfis em termos da dinâmica solo-água. No horizonte A, a área mais preservada (ES) apresenta quase o dobro do teor de matéria orgânica do que a área com floresta em estágio inicial (EP). Tal comportamento se repete ao longo de quase todos os horizontes, com exceção do último horizonte da EP, no qual os valores de matéria orgânica são maiores do que aqueles observados no horizonte de ES em mesma profundidade. Esses valores de matéria orgânica podem influenciar na estrutura do solo, afetando propriedades físicas como a densidade global e a porosidade do mesmo (BERTOLINO *et al.*, 2010), que são aspectos fundamentais para entender as respostas hidrológicas do solo.

Com relação às propriedades químicas do solo, constatamos que o desenvolvimento da vegetação tende a aumentar o teor de carbono do solo. Em nosso estudo observamos um aumento de 59,5% na área ES em relação à área EP, o que está de acordo com Chen *et al.* (2020), que encontraram valores ainda maiores de incremento de carbono orgânico

no solo. Comportamento semelhante foi observado no teor de fósforo assimilável, o qual teve um aumento de 42% na área ES em relação à área EP, mostrando que o teor de fósforo aumenta gradualmente com a densidade de indivíduos arbóreos e sua produção de serapilheira (CHEN *et al.*, 2020). Assim como nas pesquisas realizadas por Huang *et al.* (2018) e Chen *et al.* (2020), em nosso estudo os níveis de fósforo, nitrogênio, carbono e pH foram os mais influenciados, com aumento na concentração de todos esses elementos, exceto pH, na área ES. Aparentemente, devido à semelhança entre os solos das duas áreas aqui estudadas, os quais são derivados de materiais parentais semelhantes (gnaiesses e granitos), os teores de Ca, Mg e K mudam pouco entre elas. Sobre os teores, Ca, Mg e K, pesquisas evidenciam que são taxas de resposta de pouca relevância no impacto da restauração da vegetação na modificação dos solos (TAKOUTSING *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2020).

Em termos fisionômicos, a vegetação da área EP apresenta-se menos estruturada do que a da área ES, sendo que essa diferença é decorrente dos diferentes históricos de uso das áreas. Enquanto a área EP, após o cessar das atividades agrícolas, manteve-se como um pasto subaproveitado, a área ES iniciou um processo de regeneração natural. Apesar das duas áreas estarem na mesma cota altimétrica e terem condições topográficas semelhantes, a proximidade da área EP com atividades antrópicas resultou em uma área com maior degradação. Em contrapartida, a área ES possui pelo menos 60 anos de ausência de degradação, o que favoreceu a regeneração da vegetação estimulada pelo forte fluxo de propágulos oriundos de fragmentos florestais adjacentes à área. Destaca-se que a estrutura atual da área EP é decorrente do projeto Mutirão Reflorestamento, que refloresta priorizando espaços desmatados em encostas próximas a comunidades vulneráveis, com forte tendência à ocupação irregular, expostas a eventos de enchentes, assoreamento de rios e canais de drenagem. Este estudo guiou-se principalmente pela estrutura da vegetação como definidor do estágio de sucessão, mas poucos estudos relacionaram a hidrologia do solo com o aspecto temporal da vegetação (ZIMMERMANN *et al.*, 2010; HASSLER *et al.*, 2011; ARCHER *et al.*, 2016). A definição dos aspectos escolhidos pelas pesquisas para relacionar solo-vegetação são diversas, incluindo, dentre outras, densidade de raízes (BERTOLINO *et al.*, 2010; COELHO NETTO *et al.*, 1987), riqueza de espécies (TALKNER *et al.*, 2010), classificação da fitofisionomia (GERIS *et al.*, 2015) e aspectos morfológicos da vegetação (KIM *et al.*, 2014).

Efeitos da sucessão ecológica na condutividade hidráulica do solo

Os resultados das características físico-hídricas evidenciam a importância do uso da terra na influência dos valores de condutividade hidráulica do solo saturado (DONER *et al.*, 2010). Em nossos resultados de K_{sat} percebemos uma variabilidade acentuada, o que é comum para essa propriedade, que pode chegar a variações de 420% em uma

mesma área (BONNEL, 1983; WARRICK; NIELSEN, 1980). Dessa forma, torna-se possível, em uma mesma floresta, encontrarmos diferentes valores de condutividade hidráulica e, conseqüentemente, taxas distintas de recarga, devido a fatores associados às características do solo, à densidade de indivíduos arbóreos e às diferentes zonas de interceptação (WARRICK; NIELSEN, 1980, TANIGUCHI; SHARMA, 1993, GERIS *et al.*, 2015). A existência de fluxos preferenciais é outro fator determinante na amplitude dos valores de condutividade hidráulica do solo em uma determinada área. Esses fluxos podem estar associados a fendas/rachaduras no solo, buracos de raízes, principalmente nos primeiros 20 cm, (ZHANG *et al.*, 2016) e buracos feitos por animais (THOMPSON *et al.*, 2012). Nas duas áreas estudadas (EP e ES) notou-se atividade biogênica. Na área ES observaram-se padrões diversos que apontam para diferentes agentes biológicos - insetos, pássaros, répteis e roedores - enquanto em EP houve atividade visível basicamente de insetos.

Os valores de K_{sat} das duas áreas aqui estudadas, no entanto, não apresentam diferenças estatísticas significativas, embora a média em ES seja maior do que aquela observada em EP. O aumento da K_{sat} a partir da recuperação da vegetação é constatado por Zimmerman *et al.* (2006), em estudo realizado na Amazônia, que encontraram maiores médias na K_{sat} em área de regeneração natural com abandono de sete anos do que em áreas com vegetação degradada. Outras pesquisas evidenciam que a permeabilidade pode se recuperar de forma relativamente rápida, uma vez que a floresta é plantada, como evidenciou um grupo de pesquisadores liderados por Archer *et al.* (2016), que mensuraram que os valores de K_{sat} observados em uma floresta de 48 anos se encontravam próximos àqueles de uma floresta de 300 anos. As condições de K_{sat} observadas no topo do solo (15 cm de profundidade), nas áreas EP (162,02 mm/h) e ES (179,03 mm/h), atestam uma pequena diferença entre as médias das áreas, demonstrando uma tendência mais vagarosa no aumento das taxas de K_{sat} se comparada à encontrada por Archer *et al.* (2016) nas florestas mais maduras. Neste estudo, nas duas áreas analisadas, encontramos menores valores de K_{sat} na profundidade de 40 cm, sugerindo uma tendência dessa diminuição devido ao aumento nos teores de argila nas porções mais inferiores do perfil (VIEIRA; FERNANDES, 2004).

A importância do estágio de sucessão florestal no aumento da heterogeneidade espacial da permeabilidade do solo

Os resultados aqui apresentados atestam que a área em estágio primário (EP) apresenta um maior coeficiente de variação de K_{sat} , evidenciando que quanto mais madura for a floresta, mais homogêneos serão os valores de K_{sat} , o que corrobora com estudos que demonstram que essa é a propriedade do solo que possui maior variabilidade espacial e temporal em áreas com vegetação menos madura (LOZANO-BAEZ *et al.*,

2018). A classificação do solo influenciou em 80% dos valores encontrados nas taxas de permeabilidade nas pesquisas de Hrachowitz *et al.* (2009), destaca-se na pesquisa que solos refletem os efeitos integrados do clima, topografia, material de origem, vegetação e uso do solo, assim, o uso do solo pode acentuar ou atenuar essa variabilidade. Durante os trabalhos de campo foi observado que a área EP apresentava uma maior heterogeneidade, tendo a presença de gramíneas, regeneração e serapilheira, as quais encontravam-se distribuídas de forma desigual. Outro fator que pode ter contribuído para essa maior heterogeneidade de K_{sat} em EP é a maior circulação de pessoas, quando comparada com a área ES. Essa observação foi suportada pelos maiores valores de CV notados em EP (76,6%) do que em ES (61,1%) para a porção mais superficial do solo (15 cm), atestando que a variabilidade de K_{sat} diminui com a profundidade, na qual se sente menos a influência do uso da terra.

CONCLUSÕES

A hidropedologia observa a interação entre os processos pedológicos e hidrológicos em distintas escalas espaciais e temporais. O recorte do capítulo considerou o uso do solo, em particular dos solos florestais, e foi utilizada a escala do perfil do solo. Os resultados alcançados evidenciam que diferenças nas propriedades químicas, principalmente as que possuem correlação com presença de vegetação, tais como carbono orgânico, nitrogênio e fósforo ocorrem basicamente nos primeiros horizontes. Em relação ao K_{sat} as maiores diferenças ocorreram em nível de profundidade e não relacionadas ao grau de amadurecimento da vegetação, mostrando que a 15 cm de profundidade do solo obtivemos maiores valores dessa propriedade do que a 40 cm de profundidade.

A propriedade química com maior incremento foi o carbono (orgânico) e seu aumento ocorreu no estágio de sucessão secundária. Os dois solos possuem altas taxas de acidez, decorrente tanto da pobreza do material de origem em cálcio, magnésio, potássio e sódio, assim como pelo alto teor de alumínio - principalmente em EP - apontando para a intensidade da intemperização.

A condutividade hidráulica apresentou médias maiores em nosso estágio secundário, tanto a 15 cm quanto em 40 cm. Além disso, apresentou menor coeficiente de variação (CV) apontando para um solo mais homogêneo. A menor variabilidade nessa propriedade aponta para o fato de que a presença da vegetação pode regulá-la. A condutividade hidráulica foi maior na profundidade mais superficial, em que a influência do uso de terra é ainda maior e pudemos ver diferença na biomassa presente.

REFERÊNCIAS

ARCHER N. A.; OTTEN W.; SCHMIDT S.; BENGOUGH A. G.; SHAH, N.; BONELL, M. Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate. **Ecohydrology**. p. 585-600 2016.

- BERTOLINO, A. V. F. A.; FERNANDES, N. F.; MIRANDA, J. P. L.; SOUZA, A. P.; LOPES, M. R. S.; PALMIERI, F. Effects of plough pan development on surface hydrology and on soil physical properties in Southeastern Brazilian plateau. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, Holanda, v. 393, p. 94-104, 2010.
- BONNEL, M.; CASSELLS, D.S.; GILMOUR, D. A. Vertical soil water movement in a tropical rainforest catchment in north-east Queensland. *Earth Surf. Processes Landforms*, 8: p. 253-272, 1983a.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 716 p, 2012.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente (MMA), Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Conama nº 6, de maio de 1994**. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1994_006.pdf f. Acesso em: 3 dez. 2015.
- CHEN, C.; FANG, X.; XIANG, W.; LEI, P.; OUYANG, S.; KUZYAKOV, Y. Soil-plant co-stimulation during forest vegetation restoration in a subtropical area of southern China. *For. Ecosyst.* 2020, 7, 1–17.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo** 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1997. 212p. (Embrapa-CNPq. Documentos, 1).
- COELHO NETTO, A. L. C. Overland flow production in a tropical rainforest catchment: The role of litter cover. **Catena**, v. 14, p 213–231. 1987.
- FILOSO, S.; BEZERRA, M. O.; WEISS, K. C.; PALMER, M. A. Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. **PLoS ONE**, 2017, 12, e0183210.
- GERIS, J.; TETZLAFF, D.; MCDONNELL, J.; SOULSBY, C. The relative role of soil type and tree cover on water storage and transmission in northern headwater catchments. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 7, p. 1844-1860, 2015.
- HASSLER, S. K.; ZIMMERMANN, B.; van BREUGEL, M.; HALL, J. S.; ELSENBEEER, H. Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. **For. Ecol. Manag.** 2011, 261, 1634–1642.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. London: Academic Press, 1ª ed., 494 p. 1998.
- HUANG, F. F.; ZHANG, W. Q.; GAN, X. H.; HUANG, Y. H.; GUO, Y. D.; WEN, X. Y. (2018) Changes in vegetation and soil properties during recovery of a subtropical forest in South China. **J Mt Sci** 15(1):46–58.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira Classificação da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, p. 271 2012.
- LOZANO-BAEZ, S. E.; COOPER, M.; FERRAZ, S. F. B.; RIBEIRO RODRIGUES, R.; PIRASTRU, M.; DI PRIMA, S. **Previous land use affects the recovery of soil hydraulic properties after forest restoration**. *Water* 2018, 10, 453.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, p. 478, 2004.

SCIENTIFIC COLLECTIONS INTERNATIONAL. Disponível em: <http://scicoll.org/research.html>. Acesso em: 15 maio 2017.

SIOLI, H. **Amazônia**: fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais. Petrópolis: ed. vozes Ltda, p. 69, 1985.

SMAC, 2000. **Espécies Ameaçadas de Extinção no Município do Rio de Janeiro**: Flora e Fauna. Secretaria de Meio Ambiente, p. 68.2000.

SOCIETY for ecological restoration international science & policy working group. 2004. The SER international Primer on Ecological Restoration. Disponível em: www.ser.org Acesso em: 15 maio 2016.

SOLÓZARNO, A.; OLIVEIRA, R. R.; GUEDES-BRUNI, R. R. História ambiental e estrutura de uma floresta urbana. *In*: OLIVEIRA, R. R (org). **As marcas do homem na floresta**: História Ambiental de um trecho de mata urbana. PUC- Rio. Rio de Janeiro. Pp 87-118. 2005.

TAKOUTSING, B.; WEBER, J. C.; TCHOUNDJEU, Z.; SHEPHERD, K. Soil chemical properties dynamics as affected by land use change in the humid forest zone of Cameroon. **Agrofor Syst** 90(6):1089–1102. 2016.

TALKNER, U.; KRÄMER, I.; HÖLSCHER, D.; BEESE, F. O. Deposition and canopy exchange processes in central-German beech forests differing in tree species diversity. **Plant Soil** 336:405–420, 2010.

TANIGUCHI, M.; SHARMA, M. L. Determination of groundwater recharge using the change in soil temperature. **J. Hydrol.**, 148:219 229, 1993.

THERON, E.; LE ROUX, P. A. L.; HENSLEY, M.; VAN RENSBURG, I. Evaluation of the Aardvark constant head soil permeameter to predict saturated hydraulic conductivity. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, Vol 134, 2010.

THOMPSON, J.; SHEEDY, J.; ROBINSON, N.; REEN, R.; CLEWETT, T.; LIN, J. **Pre-breeding wheat for resistance to root-lesion nematodes** Leslie Research Centre, Toowoomb, 2012.

VIEIRA, S. R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **O Agrônomo**, Campinas, v.47-50, p.32-33, 1998.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In*: HILLEL, D. ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 350p. 1980.

ZHANG, Y. H.; NIU, J. Z.; ZHANG, M. X.; ZHU, W. L. 2017. Interaction between plant roots and soil water flow in response to preferential flow paths in Northern China. **Land Degradation & Development** 28: p. 648-663, 2017.

ZHAO, D.; XU, M.; LIU, G.; MA, L.; ZHANG, S.; XIAO, T.; PENG, G.; 2017. Effect of vegetation type on microstructure of soil aggregates on the Loess Plateau, China. **Agric. Ecosyst. Environ.** 242, 1–8.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; DE MORAES, J. M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. **For. Ecol. Manag.** 2006, 222, 29–38.

ZIMMERMANN, B.; PAPRITZ, A.; ELSENBEER, H. Asymmetric response to disturbance and recovery: Changes of soil permeability under forest–pasture–forest transitions. **Geoderma** 2010, 159, 209–215.