

MODELOS ESTRUTURAIS DE BIOENGENHARIA DE SOLOS NA REVEGETAÇÃO DE PILHAS DE ESTÉRIL EM MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

SOIL BIOENGINEERING STRUCTURAL MODELS FOR THE REVEGETATION OF WASTE DUMPS IN OPENCAST MINING

Maria Lucia Solera

Doutoranda no Programa de Ciências Ambientais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp) – Sorocaba (SP), Brasil. Pesquisadora, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) – São Paulo (SP), Brasil.

Admilson Irio Ribeiro

Docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Unesp – Sorocaba (SP), Brasil.

Caroline Almeida Souza

Mestre em Economia Ecológica, Universidade de Edimburgo. Pesquisadora, IPT – São Paulo (SP), Brasil.

Sofia Julia Alves Macedo Campos

Mestre em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo (USP). Pesquisadora, IPT – São Paulo (SP), Brasil.

Endereço para correspondência:

Maria Lucia Solera – Avenida Professor Almeida Prado, 532 – Cidade Universitária – CEP 05508-280 – Butantã, São Paulo (SP), Brasil – E-mail: lucinha@ipt.br

Recebido: 06/10/2017

Aceito: 18/12/2017

RESUMO

Os processos tecnológicos associados à extração mineral estão entre as principais formas de degradação do ambiente, com intenso efeito sobre a paisagem, podendo causar diversos danos ambientais. Dentre esses diferentes processos e subprodutos gerados, a pilha de estéril caracteriza-se como um novo ambiente formado pela operação mineral, sendo de difícil recomposição vegetal em função da deficiência de matéria orgânica e de nutrientes, além da heterogeneidade granulométrica do material. Este artigo discute a aplicabilidade de técnicas de bioengenharia de solos na recuperação do talude da pilha de estéril de uma mineração a céu aberto. Três modelos estruturais de bioengenharia de solos foram desenvolvidos, construídos e instalados no talude com vistas a promover a recuperação da área degradada: guirlanda, colmeia e retentor. Os índices desenvolvidos para avaliar o desempenho dos modelos indicam que a guirlanda apresentou os melhores resultados, destacando-se a baixa dificuldade, tanto na instalação do modelo na pilha de estéril quanto no preenchimento do solo-substrato/sementes, além do alto desenvolvimento das espécies de adubação verde no modelo. O segundo melhor desempenho foi alcançado pelo modelo retentor e o pior desempenho foi obtido pelo modelo colmeia.

Palavras-chave: mineração; pilha de estéril; recuperação ambiental; revegetação.

ABSTRACT

The technological processes associated to mineral extraction are among the main forms of environmental degradation, with an intense effect on the landscape, which may lead to several environmental damages. Among these different processes and by-products generated, the waste dump is characterized as a new environment formed by the mineral operation, with difficult vegetation recovery due to the deficiency of organic matter and nutrients, along with the granulometric heterogeneity of the material. This paper discusses the applicability of soil bioengineering techniques in recovering the slope of the waste dump from an opencast mining. Three structural models of soil bioengineering were developed, constructed and installed on the slope to recover the degraded area: guirlanda, colmeia and retentor. The indexes developed to assess the performance of the models indicate that guirlanda presented the best results, due to the low difficulty in both processes of installing the model on the waste dump and of filling the model with soil-substrate/seeds, besides the high development of green manure species in the model. The second best performance was achieved by the retentor model, and the worst one, by the colmeia model.

Keywords: mining; waste dump; environmental reclamation; revegetation.

INTRODUÇÃO

Os produtos minerários são recursos indispensáveis para atender às necessidades da população, principalmente quando relacionadas à alimentação, saúde, moradia e vestuário. Dessa forma, a atividade minerária seguirá ocorrendo, porém, deve-se procurar conciliar seu desenvolvimento com a minimização de impactos ambientais.

Na exploração dos recursos naturais da mineração a céu aberto, as alterações da superfície revelam-se por meio do aspecto estético, ou seja, os elementos visuais da linha, a forma, a textura, a complexidade e a cor que compõem a paisagem são, geralmente, bastante marcantes no cenário afetado.

Na atividade minerária, os processos tecnológicos associados à extração do minério envolvem a movimentação de grandes volumes de materiais, causando alterações na paisagem, modificando seu equilíbrio e resultando no desenvolvimento de novos ecossistemas (SILVA *et al.*, 2010; DONTALA *et al.*, 2015; DE QUADROS *et al.*, 2016).

Recuperar uma área degradada resultante da atividade minerária é uma obrigação das empresas mineradoras, a partir da elaboração do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), que deve prever medidas de revegetação, com vistas a estabelecer ou restabelecer a cobertura vegetal, porém, muitas vezes não se observa coerência entre as medidas praticadas e aquelas preconizadas nesse plano (MECHI; SANCHES, 2010; ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2005).

Os primeiros processos de recuperação de áreas mineradas observados se preocupavam com a revegetação, visando ao rápido recobrimento da cobertura vegetal, controle da erosão e cumprimento da legislação (DIAS; ASSIS, 2011), ou mesmo para minimizar o impacto visual (MECHI; SANCHES, 2010). De fato, a revegetação é uma prática muito utilizada na China e na Índia para recuperar cenários de degradação oriundos da exploração do carvão, áreas carentes de matéria orgânica, que ocasionam grandes perturbações antropogênicas, conduzindo de forma drástica a degradação do solo, reduzindo a biomassa, a riqueza e a diversidade microbiana do solo (SRIVASTAVA *et al.*, 2014; DE QUADROS *et al.* 2016; AGUS *et al.*, 2016). O estabelecimento da cobertura vegetal utilizando práticas revegetacionais

visa a atenuar os efeitos da atividade de exploração do carvão sobre a paisagem, além da questão da reconstrução do solo (ZHAO *et al.*; 2013), reduzir o escoamento superficial e a erosão do solo, e ser uma chave para a restauração de ecossistemas (ZHANG *et al.*, 2015). Além disso, a revegetação pode atuar como um componente fitoestabilizador, combinando espécies tolerantes a solos extremamente ácidos de áreas mineradas (YANG *et al.*, 2016).

Entretanto, existem casos em que a vegetação não consegue se estabelecer em decorrência das características da área que se pretende recuperar, havendo necessidade de outras técnicas para que isso possa ocorrer. Um exemplo claro dessa situação é a recuperação de taludes de pilhas de estéril de áreas mineradas a céu aberto.

Nesses casos, a recuperação por meio da revegetação sugere grandes dificuldades em virtude das granulometrias heterogêneas encontradas nessas áreas, consoante o material inerte descartado, em que a composição granulométrica é quem define a declividade dos taludes, conforme o ângulo de repouso do material. A heterogeneidade granulométrica da pilha de estéril proporciona dificuldades na determinação de propriedades geotécnicas do material como a coesão e o ângulo de atrito interno (ZHOU *et al.*, 2013). Uma das dificuldades condicionantes está no cálculo do fator de segurança relativo à estabilidade da pilha, pois esses fatores são descritos somente em tabelas de referência para materiais de granulometrias específicas e a sequência de disposição nas pilhas resulta em diferentes seções geotécnicas para análise. Adicionalmente, as diferentes granulometrias e a elevada declividade podem afetar o desenvolvimento ou a recolonização da vegetação nativa por meio de processos naturais de sucessão, uma vez que os finos (material de granulometria entre as frações silte e argila) tendem a passar pelos vazios promovidos pelo embricamento de blocos de maiores dimensões na ocasião das precipitações, dificultando a retenção de umidade.

Em complexos minerários, cujos depósitos de estéreis possuem granulometrias próximas às texturas encontradas em processos pedogenéticos, a inserção da vegetação torna-se facilitada, pois essas granulometrias tendem a uma condição próxima da natural (RIBEIRO *et al.*, 2014).

Contrário a essa perspectiva, os depósitos de bota-fora com matações e poucos finos tendem a não fixar uma vegetação vicejante, pois a alta permeabilidade desfavorece a retenção de umidade no local e a disponibilidade de nutrientes, dificultando a colonização por espécies vegetais.

No processo de recuperação desses taludes, a aplicação da adubação verde, utilizando espécies leguminosas, com base na sua periodicidade e na racionalização de sua aplicação, em longo e médio prazos, pode trazer imensuráveis benefícios ao solo (RIBEIRO, 2005). Essas espécies são fixadoras de carbono e nitrogênio, maximizam a ciclagem de nutrientes, favorecem a atividade biológica do solo, apresentam elevado potencial de produção de fitomassa e maior ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares. Contribuem com a biodisponibilidade de nutrientes, promovendo a estruturação de agregados do solo, dando início ao processo de sucessão natural (CHAER *et al.*, 2011; NOGUEIRA *et al.*, 2012; BOLDT-BURISCH *et al.*, 2015; NUSSBAUMER *et al.*, 2016; RASHID *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2016; VERGANI; GRAF, 2016).

O sucesso da recuperação de uma área degradada pela mineração não depende somente das características da área a ser recuperada. A escolha correta das espécies, as fontes de propágulos, polinizadores e dispersores de sementes e seus efeitos benéficos sobre o solo é que irá definir sua capacidade de melhorar o solo da área que está sendo recuperada (CHAER *et al.*, 2011; MUKHOPADHYAY *et al.*, 2013). Dessa forma, em projetos de recuperação, faz-se necessário conhecer os métodos e as técnicas a serem aplicados com vistas a criar condições básicas para a sua recuperação. Assim, considera-se que a área degradada pela atividade minerária possa ser recuperada utilizando técnicas alternativas das usualmente praticadas e preconizadas nos PRADs.

A literatura nos traz alternativas técnicas de recuperação, em diferentes contextos de degradação, passíveis de serem aplicadas em áreas degradadas pós-mineração. Nesta perspectiva, evidencia-se a bioengenharia de solos, tecnologia contextualizada no subdomínio da engenharia civil, com os mesmos objetivos e fundamentos técnicos, aliados à percepção ecológica por meio de soluções construtivas criativas, na medida em que faz uso de materiais vivos (SCHIECHTL, 1980).

De caráter multidisciplinar, a bioengenharia de solos emprega materiais naturais, vivos ou mortos, isolados ou conjugados com materiais inertes e é usada tradicionalmente para estabilizar margens de cursos d'água e taludes naturais ou construídos (DURLO; SUTILI, 2005). Essa combinação forma sistemas vivos, conjugando funcionalidade estrutural e ecológica, podendo ser utilizada para recuperar diferentes contextos de degradação (GRAY; SOTIR, 1996; SUTILI, 2007; EVETTE *et al.*, 2009; FERNANDES; FREITAS, 2011).

A bioengenharia de solos faz uso das práticas da engenharia convencional associadas a princípios ecológicos integrados; e a ecoengenharia é uma estratégia ecológica e econômica, de longo prazo, na gestão de áreas relacionadas às alterações naturais ou causadas pelo homem. São áreas inseridas na engenharia ecológica, definidas como a concepção de ecossistemas sustentáveis, que integram a sociedade humana com o ambiente natural, com benefício para ambos (STOKES *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é discutir o potencial de aplicabilidade de modelos estruturais de bioengenharia de solos para promover a recuperação de talude da pilha de estéril resultante da exploração de rocha fosfática (apatita) na Vale Fertilizantes em Cajati, São Paulo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Quanto à natureza deste estudo, o método adotado consistiu de uma pesquisa aplicada e exploratória na busca por modelos estruturais de bioengenharia de

solos com aptidão para recuperar área degradada pela atividade minerária ou adaptação de modelos já existentes.

Pesquisa bibliográfica e reconhecimento de campo

Inicialmente, realizou-se uma busca por meio da literatura especializada que descreve uma diversidade de técnicas e/ou métodos no campo da bioengenharia de solos. Em para-

lelo, foi realizado o reconhecimento de campo, considerando as principais etapas da atividade minerária, conforme indicado por Fornasari Filho *et al.* (1992): áreas lavradas

(bancadas e taludes); áreas de disposição de estéril e rejeito (bota-fora e barragem de rejeito); área industrial (entorno das unidades de beneficiamento e áreas de apoio, estocagem, vias de circulação, escritório e oficinas).

No reconhecimento de campo foram visitadas seis áreas, localizadas nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Paraíba, com técnicas de recuperação ambiental, no contexto da bioengenharia de solos, compreendendo: parques urbanos, rodovias, área de mineração e áreas de empréstimo de hidrelétrica. As técnicas empregadas nessas áreas tinham como principal finalidade controlar

Área de estudo

Os estudos foram conduzidos na Mina Vale Cajati, que integra o Complexo Minerquímico da Vale Fertilizantes, situada na região central do município de Cajati, ao norte de sua área urbanizada, no Vale do Ribeira, região sul do estado de São Paulo (Figura 1), compreendendo as coordenadas de 24°41'00"/24°43'00"S e 48°07'00"/48°09'00"W. É uma região que se caracteriza como uma das mais importantes do estado de São Paulo por abrigar uma rica biodiversidade e possuir o maior contínuo remanescente de Mata Atlântica do país (KRONKA, 2007).

A região do Vale do Ribeira, na qual se localiza a mina de Cajati, está representada pela Floresta Ombrófila Densa, com características ombrotérmicas, ligada a fatores climáticos tropicais de temperaturas elevadas, com médias de 25°C e com alta precipitação pluviométrica bem distribuída durante o ano, de 0 a 60 dias secos, sem períodos biologicamente secos (IBGE, 2012).

Os Sistemas de Classificação Climática (SCC) definem os climas de diferentes regiões a partir das variáveis

a erosão, inclusive no estágio de boçorocamento, estabilizar talude fluvial, encostas naturais ou taludes de corte e aterro. As características dessas técnicas foram analisadas por Solera *et al.* (2014). O reconhecimento da aplicação das técnicas de bioengenharia foi agregado aos conhecimentos obtidos na literatura, revelando que as técnicas aplicadas em diferentes contextos de degradação apresentavam similaridades com as da literatura e estavam compatíveis com os objetivos de recuperação e processos envolvidos, evidenciando-se, também, o potencial de aplicação em taludes de pilhas de estéril (SOLERA *et al.*, 2014).

temperatura, umidade e chuva. O sistema, notadamente mais bem utilizado na atualidade, proposto por Köppen (1928), partiu do entendimento de que a vegetação natural é a melhor expressão do clima de uma região. Essa classificação foi modificada para o Brasil por Setzer (1966) para inserção do tipo climático Am (tropical com chuvas excessivas e inverno seco).

Em contexto mais amplo, o município de Cajati, conforme Setzer (1966), encontra-se nas faixas de climas dos tipos Cfa (subtropical quente sem estação seca) e Cfb (subtropical temperado sem estação seca), classificados como subtropical, em que: Cfa é quente sem estação seca, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, e do mês mais quente igual ou superior a 22°C e chuvas superiores ou iguais a 30 mm; e Cfb é temperado sem estação quente, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C, e do mês mais quente inferior a 22°C e chuvas superiores ou iguais a 30 mm.

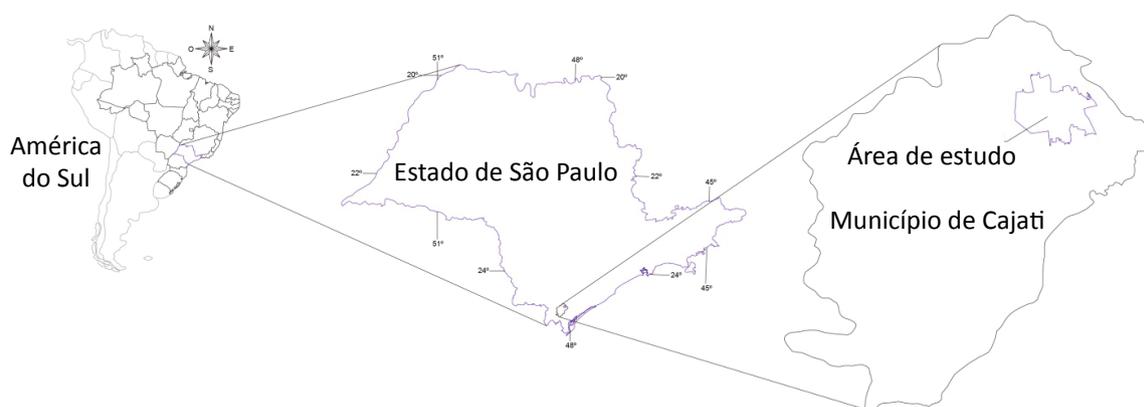


Figura 1 – Localização do Complexo Minerquímico da Vale Fertilizantes – Unidade Cajati.

Área experimental

Na escolha da área experimental foi adotada como premissa que a área deveria apresentar condições adequadas para a finalidade do experimento, ou seja, condições favoráveis para o desenvolvimento e a instalação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos. Assim, para a escolha da área foram identificados os critérios de seleção e classificados com escala relativa qualitativa a semiquantitativa, a saber: contexto da paisagem (entorno 1 km — florestal); disposição da empresa em colaborar com o estudo (alta); segurança e proteção do experimento (alta); dificuldade para implantar o experimento (alta); e ausência de relatos na literatura acerca da aplicação da bioengenharia de solos em talude de pilha de estéril (sim). Esses critérios

Desenvolvimento dos modelos estruturais

O conhecimento das técnicas descritas na literatura e as aplicações em campo mostraram a inexistência de técnicas específicas e compatíveis com as condições locais para recuperar o talude da pilha de estéril do Complexo Mineralógico da Vale Fertilizantes.

de seleção, considerados como relevantes, foram analisados a partir de informações obtidas em campo, de modo a orientar a escolha da área.

Na análise desses critérios e com vistas a contribuir com os objetivos deste artigo foi escolhido o talude da pilha de estéril do bota-fora oeste do Complexo Mineralógico da Vale Fertilizantes (Figuras 2 e 3), assim designado devido à sua localização na área dessa empresa. O talude tem área de 35 ha, altura máxima de 80 m, bancadas com alturas que variam entre 10 e 20 m com duas faces, sendo uma com 76 m de extensão e outra com 106 m. Para efeito deste estudo foi utilizada somente uma face do talude, com 16,70 m de altura, 50 m de extensão e inclinação superior a 45°.

Diante da heterogeneidade do material depositado na pilha e do elevado índice de vazios, para auxiliar na escolha de modelos de recuperação de bioengenharia de solos foi realizado um teste experimental em uma das faces do talude da pilha de estéril, com a colocação de solo/substrato sobre os blocos e simulação da precipitação, de modo a observar a perda de finos.



Fonte: Modificado de Google Earth, versão 7.3.0 (data da imagem: 03/05/2013).

Figura 2 – Localização da área experimental.



Figura 3 – Feição geral de talude da pilha de estéril.

Os resultados obtidos com o teste, apresentados em Ribeiro *et al.* (2014), sugeriram optar por técnicas com função de promover a retenção do solo para viabilizar a introdução de vegetação. Essa etapa contribuiu para a idealização de três protótipos, a partir da adaptação de técnicas já existentes, praticadas e consolidadas em contextos diversos de degradação.

Os protótipos foram construídos com materiais naturais e submetidos a um teste piloto em talude construído com altura média de 8 m, largura de 5 m e inclinação de 23°. Nesse talude foi realizada a conformação geométrica de modo a obter inclinação e configuração mais uniformes.

Construção dos modelos estruturais

Três modelos estruturais denominados guirlanda, colmeia e retentor foram projetados e dimensionados de forma a receber uma espessura mínima de 0,20 m de solo em sua porção interna. A construção desses modelos consistiu de uma etapa do projeto que definiu as dimensões, os espaçamentos e o posicionamento no talude da pilha de estéril (Figura 4). Os modelos foram construídos de forma que houvesse uma parte interna

para receber o solo com sementes de leguminosas de *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima* e *Cajanus cajan*. O uso de leguminosas conjugadas com os modelos estruturais consistiu da primeira etapa de recuperação, visando promover condições para fixação e produção vegetal em área onde não há suporte para se proceder ao plantio de arbóreas, bem como o desenvolvimento natural da vegetação.

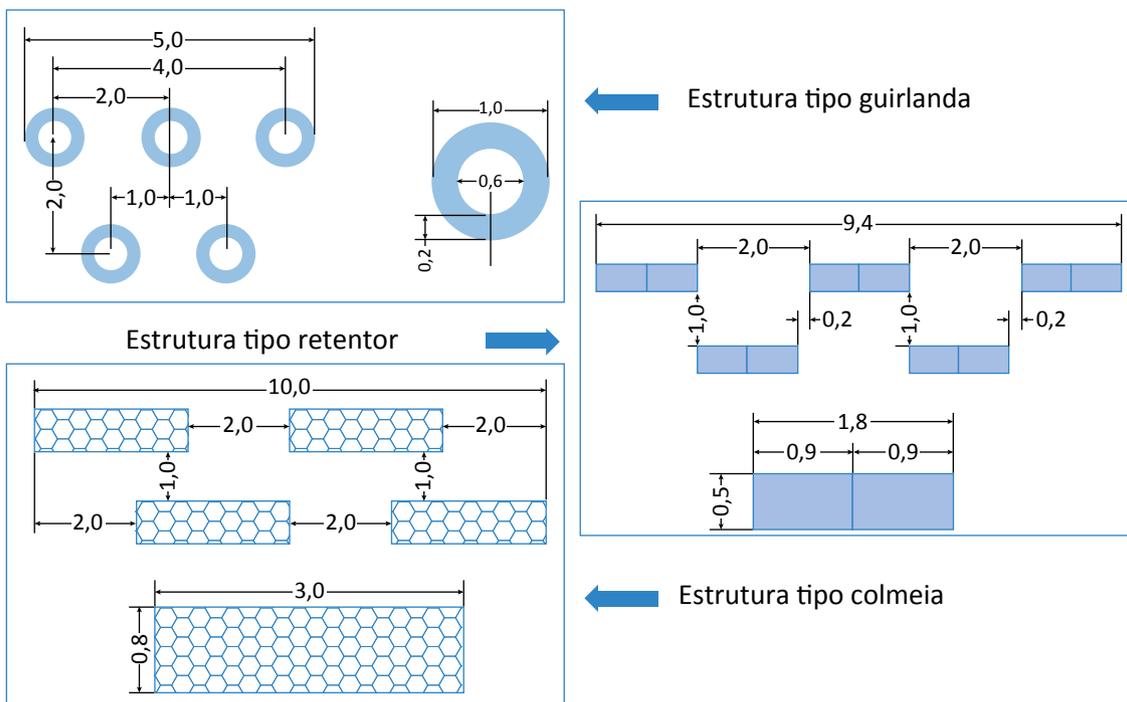


Figura 4 – Projeto com posicionamento dos modelos estruturais no talude e detalhe com dimensões das estruturas de bioengenharia de solos.

Finalizado o projeto, procedeu-se à confecção dos modelos estruturais de bioengenharia de solos. Para o modelo estrutural colmeia foram utilizados 10,00 m de tecido de juta com 1,00 m de largura. Cortes, dobras e grampeamentos foram necessários para obter a forma projetada, ficando o modelo com 3,00 m de comprimento, 0,80 m de largura e altura de 0,30 m. Essa estrutura foi idealizada a partir da arquitetura das colmeias construídas pelas abelhas e das geocélulas empregadas em obras de engenharia geotécnica. No modelo estrutural guirlanda, 3,30 m de tecido, com 1,00 m de largura foram utilizados, ficando com 1,00 m de diâmetro externo, 0,60 m de diâmetro interno e 0,20 m de altura. Idealizado a partir de técnicas já existentes utilizadas para preencher ravinas (solo ensacado), reduzir a velocidade da água em áreas inclinadas, por meio de murundus em linhas de solo ensacado, o

modelo estrutural retentor foi construído a partir da união de duas sacarias de café de 0,90 m, fechadas com fio de sisal, ficando com 1,80 m de comprimento e 0,50 m de largura, amarradas a uma corda e lançadas ao talude.

Assim, visando à melhor relação custo/benefício e biodegradabilidade para a construção dos modelos estruturais, foi utilizada a tela de juta-P-9100 S/F (fibra têxtil vegetal — *Corchorus capsulari*) como principal material construtivo para os modelos estruturais denominados colmeia e guirlanda. Nesse último, além da juta, foi utilizada a palha de junco seca, resíduo originado de atividades industriais, como material complementar de preenchimento, que lhe conferiu a forma circular, e fio de sisal para fechamento da estrutura. Para o modelo estrutural retentor, optou-se pelo reuso de sacarias de café, cuja matéria-prima também é a juta.

Preparação do talude para instalação dos modelos estruturais

Em novembro de 2014 foi lançada sobre o talude da pilha de estéril uma camada de 0,10 m de areia calcária (Figura 5A), material remanescente das atividades de mineração (rejeito) da Vale. Essa etapa, necessária à instalação dos modelos estruturais, teve como finalidade regularizar a superfície e promover o acesso mais seguro para a instalação das estruturas, além de proporcionar certo preenchimento dos vazios existentes no talude. Em abril de 2015 foi realizada a delimitação

do talude em quatro setores, com espaçamento de 50 m cada. Cada um desses setores foi dividido em cinco campos de 10 m para posicionamento das unidades de cada modelo estrutural. Somente três deles foram utilizados no experimento, um para cada modelo estrutural de bioengenharia de solos, nos quais foi observada a ocorrência do processo natural de propagação do capim-napier (*Pennisetum purpureum*) (Figura 5B).



Figura 5 – (A) Regularização da superfície do talude com areia calcária; (B) solo-substrato homogeneizado com sementes e propagação natural de capim-napier na área experimental (imagem aérea capturada com veículo aéreo não tripulado — VANT).

Instalação dos modelos estruturais

Para a instalação dos modelos estruturais (Figuras 6A, 6B e 6C), utilizou-se técnica de rapel, devido à configuração dos modelos estruturais e das características do talude da pilha de estéril. A instalação dos modelos estruturais guirlanda (32 unidades) e colmeia (12 unidades) teve início a partir da base do talude até sua crista.

Após a instalação, os modelos estruturais guirlanda e colmeia receberam camada do solo-substrato homo-

geneizado com sementes de leguminosas de *Crotalaria juncea*, *Mucuna aterrima* e *Cajanus cajan* (Figura 5B), utilizando um duto condutor de solo, que conduziu a mistura até cada uma das unidades estruturais. Particularmente para o modelo estrutural retentor (15 unidades), optou-se pelo simples lançamento no talude a partir da crista após seu preenchimento com solo-substrato e posicionamento final no talude utilizando também a técnica de rapel.

Índices de desempenho

A avaliação de desempenho dos modelos estruturais de bioengenharia de solos foi realizada com vistas a responder se os modelos possuíam potencial de aplicabilidade para recuperar o talude da pilha de estéril ou outros contextos de degradação de áreas mineradas semelhantes à área deste estudo. Para tanto, foi realizada uma análise utilizando seis critérios: critério 1 = confecção do modelo (dificuldade); critério 2 = confecção do modelo (custo); critério 3 = instalação do modelo (dificuldade); critério 4 = colocação do solo-substrato/sementes (dificuldade); critério 5 = retenção do solo-substrato/sementes e critério 6 = adubação verde (desenvolvimento). Esses critérios foram estabelecidos a partir de informações e situações observadas em quatro campanhas de campo, imagens fotográficas e imagens capturadas por veículo aéreo não tripulado (VANT), durante um período de 15 meses após a

instalação dos modelos estruturais. Os critérios retenção do solo-substrato/sementes e adubação verde (desenvolvimento) estão relacionados à estruturação de agregados do solo, por meio do sistema radicular das plantas com vistas a favorecer a sucessão natural (NOGUEIRA *et al.*, 2012; ROSA *et al.*, 2014; COLODETE *et al.*, 2014; CAPILLERI *et al.*, 2016; STUMPF *et al.*, 2016). O critério confecção do modelo (custo) está relacionado ao uso de material local e natural, inserido no conceito de bioengenharia de solos, o que lhe confere menor custo se comparado às técnicas tradicionais da engenharia (LI; EDDLEMAN, 2002; LI, 2006; PINTO, 2009). Para o critério instalação do modelo (dificuldade), a declividade é um fator que influencia a estabilidade de um talude na instalação de uma técnica de bioengenharia de solos (BISCHETTI *et al.*, 2010), além da própria configuração do modelo.

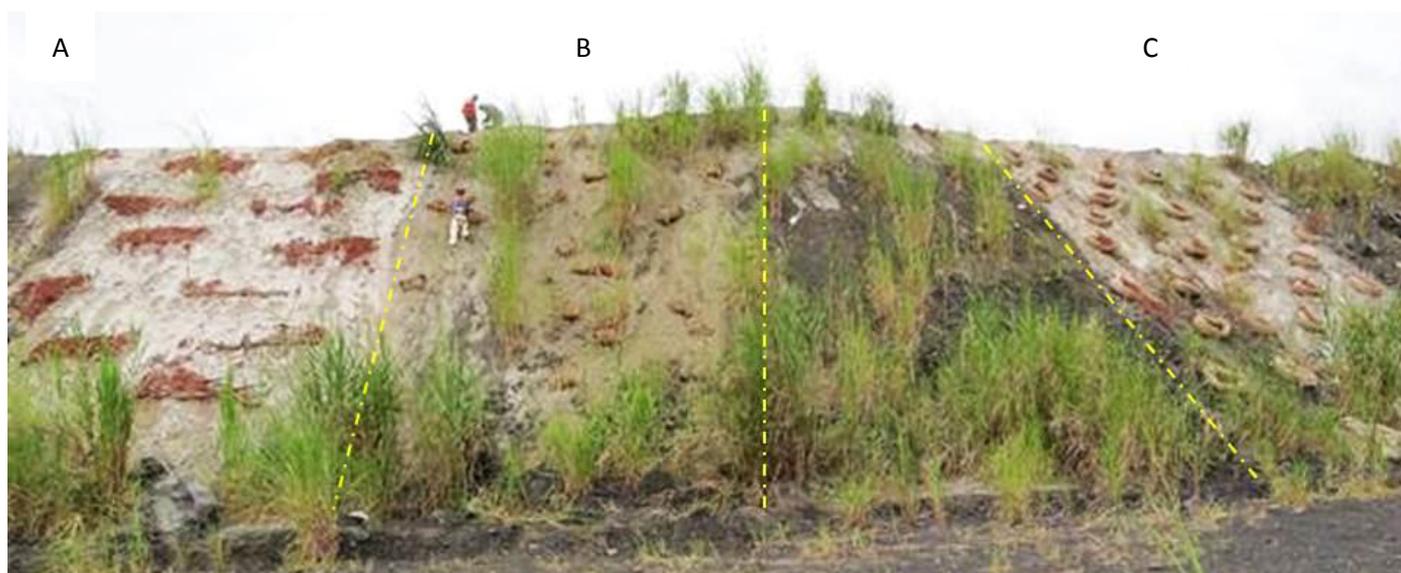


Figura 6 – Vista geral do talude após instalação das estruturas: (A) modelo estrutural colmeia; (B) modelo estrutural retentor; (C) modelo estrutural guirlanda.

Já os critérios confecção do modelo e colocação do solo-substrato/sementes foram selecionados a partir da experiência deste estudo. Na confecção, a dificuldade foi atribuída ao manuseio do material construtivo que originou os modelos colmeia e guirlanda e, para o critério colocação do solo-substrato, foi conferida ao posicionamento do duto condutor no talude no preenchimento dos modelos guirlanda e colmeia.

Na atribuição da pontuação, para os seis critérios preestabelecidos, os escores foram definidos assumindo que o maior valor representa melhor desempenho e o valor mais baixo, desempenho ruim (ALVES; BASTOS, 2011). A esses escores foram atribuídos valores correspondentes a números inteiros: 0 (baixo desempenho), 1 (médio desempenho) e 2 (bom desempenho) para cada critério relacionado aos modelos estruturais. Dessa forma, foram obtidos dois índices de desempenho: o índice de desempenho dos critérios (I_c) e o índice de desempenho dos modelos estruturais (I_{ME}), utilizando-se as Equações 1 e 2:

$$I_c = \frac{E_c}{E_{\max_c}} \quad (1)$$

$$I_{ME} = \frac{1}{N} \sum I_c \quad (2)$$

Em que:

I_c = o índice de desempenho dos critérios;

I_{ME} = o índice de desempenho dos modelos estruturais;

N = o número de critérios;

E_c = o escore do c-ésimo critério ($c = 1$ a 6);

E_{\max_c} = o escore máximo do c-ésimo.

C = c-ésimo critério ($c = 1$ a 6), onde 1 = confecção (dificuldade), 2 = confecção (custo), 3 = instalação (dificuldade), 4 = colocação do solo-substrato (dificuldade), 5 = retenção do solo-substrato e 6 = adubação verde (desenvolvimento).

Os valores obtidos com a aplicação da Equação 1 mostram o desempenho de cada modelo estrutural — colmeia, retentor e guirlanda — aplicado na área experimental, para cada critério analisado individualmente. A aplicação da Equação 2 gerou o índice de desempenho de cada modelo estrutural para o conjunto de critérios analisados.

O desempenho final de cada modelo estrutural foi classificado em baixo, médio e bom, gerando três intervalos qualitativos com base nos valores de I_{ME} obtidos, sendo: baixo desempenho ($I_{ME} = 0,00$ a $0,33$), médio desempenho ($I_{ME} = 0,34$ a $0,67$) e bom desempenho ($I_{ME} = 0,68$ a $1,00$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 e a Figura 7 apresentam os resultados obtidos com a aplicação dos modelos estruturais colmeia, retentor e guirlanda na área experimental. Comparando-se o desempenho de I_{ME} dos modelos estruturais, percebe-se que a colmeia apresentou desempenho baixo e o retentor desempenho médio, com valores de I_{ME} de 0,17 e 0,58, respectivamente, já a guirlanda mostrou bom desempenho, com valor de I_{ME} de 0,75. Esses resultados sugerem que para os modelos estruturais de bioengenharia de solos aplicados na situação verificada na pilha de estéril, o modelo estrutural guirlanda mostrou-se mais eficiente, exercendo de maneira satisfatória as funções para as quais foi projetado.

Entretanto, ainda que os modelos estruturais tenham alcançado diferentes faixas de desempenho, considera-se que todos os modelos apresentam elevado potencial de aplicabilidade. Particularmente para o modelo guirlanda, de estrutura circular e va-

zada, tem-se que o bom desempenho foi atribuído à leveza do modelo, facilidade de instalação, fixação no talude e de transporte. A forma e a dimensão do modelo também favoreceram o desenvolvimento da adubação.

Dos critérios adotados para avaliar o desempenho dos modelos estruturais, na avaliação geral, a guirlanda obteve bom desempenho ($I_{ME} = 0,75$), sendo que os menores valores foram para os critérios: confecção do modelo (dificuldade), com $I_c = 0,50$; confecção do modelo (custo), com $I_c = 0,50$ e retenção do solo-substrato/sementes, com $I_c = 0,50$. Os maiores valores foram para os critérios: instalação do modelo (dificuldade), com $I_c = 1,00$; colocação solo-substrato/sementes (dificuldade), com $I_c = 1,00$ e desenvolvimento da adubação verde, com $I_c = 1,00$.

Ao contrário da guirlanda, o modelo retentor obteve maior avaliação nos critérios confecção do modelo (dificuldade), com $I_c = 1,00$ e confecção dos modelos (custo),

com $I_c = 1,00$; e menores valores para os critérios: instalação do modelo (dificuldade), com $I_c = 0,00$; colocação do solo-substrato/sementes (dificuldade), com $I_c = 0,50$;

retenção do solo/sementes, com $I_c = 0,50$ e desenvolvimento da adubação verde, com $I_c = 0,50$; e, ainda assim, obteve desempenho médio ($I_{ME} = 0,58$).

Quadro 1 – Critérios de desempenho dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.

Modelos/critérios	Colmeia	I_c	Retentor	I_c	Guirlanda	I_c
Confecção do modelo (dificuldade)	Alta: unir peças do tecido, dobrar e pregar para formar as células	0,00	Baixa: a sacaria de café facilitou a costura ajustada ao projeto	1,00	Média: dar forma ao modelo com palha de junco seca e fechar com fio de sisal	0,50
Confecção do modelo (custo)	Médio: uso de fibra têxtil vegetal (<i>Corchorus capsulari</i> — juta) e grampos	0,50	Baixo: reuso de sacarias de café e fio de sisal para unir as sacarias	1,00	Médio: uso de fibra têxtil vegetal (<i>Corchorus capsulari</i> — juta); fio de sisal; contratação de terceiros; construção do modelo	0,50
Instalação do modelo (dificuldade)	Média: dificuldade de fixar e estaquear o modelo no talude devido à dimensão	0,50	Alta: grande esforço na instalação devido ao peso da própria estrutura, não favorecendo o posicionamento no talude	0,00	Baixa: modelo apresenta leveza, fácil de transportar, instalar e estaquear	1,00
Colocação solo-substrato/sementes (dificuldade)	Alta: colocar mistura solo-substrato/sementes com duto coletor em cada uma das células	0,00	Média: o solo-substrato/sementes foi colocado fora do talude	0,50	Baixa: colocação do solo-substrato no modelo com duto coletor no talude	1,00
Retenção do solo-substrato/sementes	Baixa: grande perda de solo devido ao posicionamento do modelo no talude de alta declividade	0,00	Média: menor perda de solo-substrato/sementes devido à configuração do modelo	0,50	Média: menor perda de solo-substrato/sementes devido à configuração do modelo	0,50
Adubação verde (desenvolvimento)	Baixo: perda de solo-substrato/sementes devido à deformação do modelo, prejudicando a adubação verde	0,00	Médio: necessidade de fazer aberturas na estrutura para auxiliar a adubação verde	0,50	Alto: configuração favoreceu adubação verde	1,00
Desempenho/ I_{ME}	baixo	0,17	médio	0,58	bom	0,75

I_c : índice de desempenho dos critérios; I_{ME} : índice de desempenho dos modelos estruturais.

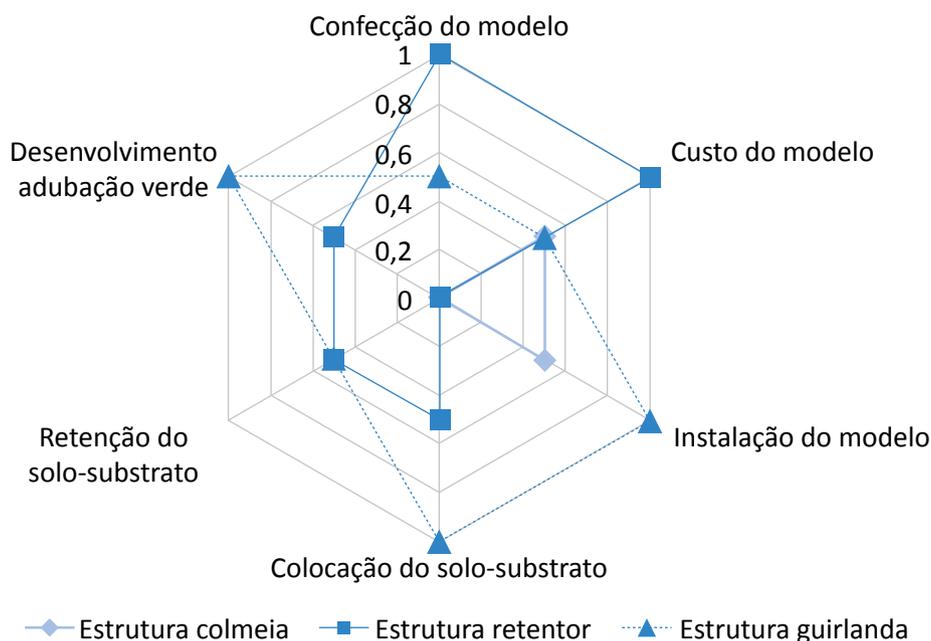


Figura 7 – Desempenho (I_c) dos modelos estruturais de bioengenharia de solos.

O baixo desempenho da colmeia ($I_{ME} = 0,17$) deve-se aos menores valores atribuídos a quatro dos seis critérios: confecção dos modelos (dificuldade), com $I_c = 0,00$; colocação solo-substrato/sementes (dificuldade), com $I_c = 0,00$; retenção do solo-substrato/sementes, com $I_c = 0,00$; desenvolvimento da adubação verde, com $I_c = 0,00$; e valores maiores para os critérios: confecção do modelo (custo), com $I_c = 0,50$ e instalação do modelo (dificuldades), com $I_c = 0,50$.

Os critérios utilizados para este estudo foram considerados suficientes e satisfatórios para alcançar o objetivo deste trabalho na avaliação dos modelos estruturais de bioengenharia de solos, mesmo considerando a possibilidade de se adotar um maior número de critérios de seleção para avaliar de forma mais detalhada o desempenho dos modelos guirlanda, colmeia e retentor.

CONCLUSÕES

O estudo realizado mostrou a aplicabilidade de modelos estruturais de bioengenharia de solos para recuperar o talude da pilha de estéril no Complexo Minerquímico da Vale Fertilizantes, Cajati, São Paulo, tendo se destacado o modelo guirlanda. Os critérios preestabelecidos especificamente para avaliar esses modelos indicam potencial de aplicabilidade em futuros projetos de pesquisas para recuperar situações similares de degradação em áreas de mineração a céu aberto. São modelos de simples construção, possuem flexibilidade, dispensam o uso de mão de obra especializada e maquinários pesa-

dos e oferecem melhor custo-benefício se comparados aos métodos tradicionais de recuperação em áreas de disposição de estéril e rejeito (bota-fora).

Tratando-se de uma tecnologia comumente praticada para estabilizar margens de cursos d'água e taludes naturais ou construídos, a aplicação dos modelos estruturais constitui um desafio nas condições verificadas nas pilhas de estéril, considerando as dificuldades relacionadas ao ineditismo do tema, cuja aplicação da tecnologia ainda é incipiente no meio técnico-científico para esse fim.

Em termos de aperfeiçoamento das técnicas que possam ser aplicadas nesse segmento de pesquisa, muito há que se investigar com vistas a ampliar seu potencial de uso, no desenvolvimento de novas técnicas específicas para taludes de pilha de estéril e/ou na avaliação

de outras técnicas descritas na literatura, ou mesmo na escolha do material construtivo, dimensões estruturais e monitoramento de desempenho perante condições de formação de substrato para suporte de vegetação de porte arbustivo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), à Vale S.A., ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de

São Paulo e aos colegas Caio Pompeu Cavalhieri, Priscila Ikematsu, Mariana Hortelani Carneseca Longo, Omar Yazbek Bitar e Ana Maria Azevedo Dantas Marins.

REFERÊNCIAS

- AGUS, C.; PUTRA, P. B.; FARIDAH, E.; WULANDARI, D.; NAPITUPULU, R. R. Organic carbon stock and their dynamics in rehabilitation ecosystem areas of post open coal mining at tropical region. *Procedia Engineering*, v. 159, p. 329-337, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.201>
- ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ, L. H. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 47-54, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622005000100006>
- ALVES, L. B.; BASTOS, R. P. Sustentabilidade em Silvânia (GO): o caso dos assentamentos rurais São Sebastião da Garganta e João de Deus. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 49, n. 2, p. 419-448, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-20032011000200007>
- BISCHETTI, G. B.; CHIARADIA, E. A.; D'AGOSTINO, V.; SIMONATO, T. Quantifying the effect of brush layering on slope stability. *Ecological Engineering*, v. 36, n. 3, p. 258-264, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.019>
- BOLDT-BURISCH, K.; NAETH, M. A.; SCHNEIDER, B. U.; HÜTTL, R. F. Linkage between root systems of three pioneer plant species and soil nitrogen during early reclamation of a mine site in Lusatia, Germany. *Restoration Ecology*, v. 23, n. 4, p. 357-365, 2015. DOI: [10.1111/rec.12190](https://doi.org/10.1111/rec.12190)
- CAPILLERI, P. P.; MOTTA, E.; RACITI, E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization. *Procedia Engineering*, v. 158, p. 116-121, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.415>
- CHAER, G. M.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M.; BODDEY, R. M. Use nitrogen-fixing legume trees to revegetate degraded lands. *Tree Physiology*, v. 00, p. 1-11, 2011. DOI: [10.1093/treephys/tpq116](https://doi.org/10.1093/treephys/tpq116)
- COLODETE, C. M.; DOBBS, L. B.; RAMOS, A. C. Aplicação das micorrizas arbusculares na recuperação de áreas impactadas. *Natureza on line*, v. 12, n. 1, p. 31-37, 2014.
- DE QUADROS, P. D.; ZHALNINA, K.; DAVIS-RICHARDSON, A. G.; DREW, J. C.; MENEZES, F. B.; CAMARGO, F. A. O.; TRIPLETT, E. W. Coal mining practices reduce the microbial biomass, richness and diversity of soil. *Applied Soil Ecology*, v. 98, p. 195-203, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.016>
- DIAS, L. E.; ASSIS, I. R. Restauração ecológica em áreas degradadas pela mineração. In: SIMPÓSIO DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA: DESAFIOS ATUAIS E FUTUROS, 4., 2011, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Instituto de Botânica/SMA, 2011.

- DONTALA, S. P.; REDDY, T. B.; VADDE, R. Environmental aspects and impacts its mitigation measures of corporate coal mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, v. 11, p. 2-7, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.06.002>
- DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. *Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água*. Porto Alegre: EST Edições, 2005. 198 p.
- EVETTE, A.; LABONNE, S.; REY, F.; LIEBAULT, F.; JANCKE, O.; GIREL, J. History of bioengineering techniques for erosion control in rivers in Western Europe. *Environmental Management*, v. 43, n. 6, p. 972-984, jun. 2009. DOI: 10.1007/s00267-009-9275-y
- FERNANDES, J. P.; FREITAS, A. R. M. *Introdução à engenharia natural*. Lisboa: Empresa Portuguesa de Águas Livres, 2011. v. 2.
- FORNASARI FILHO, N. (Org.). *Alterações no meio físico decorrentes de obras de engenharia*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1992. 165 p. (Publicação IPT, 1.972; Boletim, 61).
- GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. *Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control*. Nova York: John Wiley & Sons, 1996. 337 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Manual técnico da vegetação brasileira*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 275 p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 1).
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha Justus Perthes, 1928. Wall-map 150 cm x 200 cm.
- KRONKA, F. J. N. (Org.). *Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo: regiões administrativas de São José dos Campos (litoral), Baixada Santista e Registro*. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente; Imprensa Oficial, 2007. 137 p.
- LI, M.-H. Learning from streambank failures at bridge crossings: a biotechnical streambank stabilization project in warm regions. *Landscape and urban planning*, v. 77, n. 4, p. 343-358, 2006. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.04.006
- LI, M.-H.; EDDLEMAN, K. E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods: a biotechnical streambank stabilization design approach. *Landscape and Urban Planning*, v. 60, n. 4, p. 225-242, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00057-9)
- MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 209-220, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142010000100016>
- MUKHOPADHYAY, S.; MAITI, S. K.; MASTO, R. E. Use of reclaimed mine soil index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land. *Ecological Engineering*, v. 57, p. 133-142, 2013. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.017
- NOGUEIRA, N. O.; OLIVEIRA, O. M.; MARTINS, C. A. S.; BERNARDES, C. O. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 8, n. 14, p. 2121-2131, jun. 2012.
- NUSSBAUMER, Y., COLE, M. A.; OFFLER, C. E.; PATRICK, J. W. Identifying and ameliorating nutrient limitations to reconstructing a forest ecosystem on mined land. *Restoration Ecology*, v. 24, n. 2, p. 202-211, 2016. DOI: 10.1111/rec.12294
- PINTO, G. M. *Bioengenharia de solos na estabilidade de taludes: comparação com uma solução tradicional*. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

RASHID, M. I.; MUJAWAR, L. H.; SHAHZAD, T.; ALMEELBI, T.; ISMAIL, I. M. I.; OVES, M. Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research*, v. 183, p. 26-41, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.11.007>

RIBEIRO, A. I. *Mecanização no preparo de solo em áreas degradadas por mineração na Floresta Nacional do Jamari (Rondônia-BR)*. 172 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

RIBEIRO, A. I.; SOLERA, M. L.; NAHUZ, M. A. R.; LONGO, M. H. C.; CAMPOS, J. J. A. M.; FENGLER, F. H. Engenharia natural aplicada em taludes de bota-fora: uma análise preliminar da solo-retenção. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 10., 2014, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 2014.

ROSA, P. A. L.; ALVES, M. C.; VIDEIRA, M. L. L.; BONINI, C. B. S. Recuperação de um solo de cerrado após 19 anos: ocorrência espontânea de espécies arbóreas. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 1, n. 1, p. 44-57, 2014.

SCHIECHTL, H. M. *Bioengineering for land reclamation and conservation*. Edmonton: University of Alberta Press, 1980.

SETZER, J. *Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo*. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1966. 61 p.

SILVA, R. B.; BECKER, R. G.; MACHADO, T. F.; DORNELLES, J. E. Monitoramento de áreas em recuperação: padrões de colonização da comunidade de vertebrados terrestres. In: ALBA, J. M. F. *Recuperação de áreas mineradas*. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p. 181-221.

SOLERA, M. L.; GALLARDO, A. L. C. F.; SOUZA, C. A.; LONGO, M. H. C.; BRAGA, T. O. Bioengenharia de solos: aplicabilidade na recuperação de áreas mineradas e na oferta de serviços ambientais. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 34, p. 46-59, 2014.

SOUZA, C. A.; GALLARDO, A. L. C. F.; SILVA, E. D.; MELLO, Y. C.; RIGHI, C. A.; SOLERA, M. L. Environmental services associated with the reclamation of areas degraded by mining: potential for payments for environmental services. *Ambiente & Sociedade*, v. 19, n. 2, p. 137-168, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422ASOC129835V1922016>

SRIVASTAVA, N. K.; RAM, L. C.; MASTO, R. E. Reclamation of overburden and lowland in coal mining area with fly ash and selective plantation: a sustainable ecological approach. *Ecological Engineering*, v. 71, p. 479-489, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.062>

STOKES, A.; DOUGLAS, G. B.; FOURCAUD, T.; GIADROSSICH, F.; GILLIES, C.; HUBBLE, T.; KIM, J. J.; LOADES, K. W.; MAO, Z.; MCIVOR, I. R.; MICKOVSKI, S. B.; MITCHELL, S.; OSMAN, N.; PHILLIPS, C.; POESEN, J.; POLSTER, D.; PRETI, F.; RAYMOND, P.; REY, F.; SCHWARZ, M.; WALKER, L. R. Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*, v. 377, n. 1-2, p. 1-23, 2014. DOI: 10.1007/s11104-014-2044-6

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, P. L. F. S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. *Soil and Tillage Research*, v. 161, p. 71-78, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.03.005>

SUTILI, F. J. *Bioengenharia de solos no âmbito fluvial do Sul do Brasil*. 94 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Perigos Naturais, Instituto de Bioengenharia de Solos e Planejamento da Paisagem, Universidade Rural de Viena, Viena, 2007.

VERGANI, C.; GRAF, F. Soil permeability, aggregate stability and root growth: a pot experiment from a soil bioengineering perspective. *Ecohydrology*, v. 9, n. 5, p. 830-842, 2016. DOI: 10.1002/eco.1686

YANG, S. X.; LIAO, B.; YANG, Z. H.; CHAI, L. Y.; LI, J. T. Revegetation of extremely acid mine soils based on aided phytostabilization: a case study from southern China. *Science of the Total Environment*, v. 562, p. 427-434, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.208

ZHANG, L.; WANG, J.; BAI, Z.; CHUNJUAN, L. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena*, v. 128, p. 44-53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.016>

ZHAO, Z.; SHAHROUR, I.; BAI, Z.; FAN, W.; FENG, L.; LI, H. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. *European Journal of Soil Biology*, v. 55, p. 40-46, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.08.006>

ZHOU, J.; SHI, C.; XU, F. Geotechnical characteristics and stability analysis of rock-soil aggregate slope at the Gushui Hydropower Station, Southwest China. *The Scientific World Journal*, v. 2013, p. 1-16, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/540636>