

Modelagem de lixiviados e compostos gerados em sistema de drenagem de aterro controlado de Macapá/Brasil

No Brasil os aterros sanitários (LF) apresentam um significativo e histórico déficit de implementação. Recentemente, por imposição legal, os projetos de LF têm sido exigidos para superar o grave cenário da disposição inadequada de resíduos sólidos nos municípios. Na Amazônia brasileira são ainda raros os estudos de concepção e operação com base em análise de variáveis físicas, químicas e biológicas relevantes. Contudo, apesar da escassez de dados sobre LF na Amazônia, os recentes avanços científicos em modelagem e simulação computacional podem ser úteis para abordar o problema sob novas perspectivas, a partir da análise e otimização de processos aplicáveis em projetos (Vp) e operação de LF. No presente estudo foram analisados os lixiviados do LF no Município de Macapá/Brasil, usando múltiplos modelos e análise de sistemas (MODUELO). Foram realizadas análises sistemáticas dos parâmetros relevantes de projeto e operação do Aterro Controlado (LFC) por meio de balanços de massa e energia usando dados locais e parâmetros comuns aplicados em casos similares da literatura. Na segunda etapa, testamos estatisticamente três cenários simulados sobre o complexo sistema de fluxos de lixiviados e seus potenciais impactos no LF e no seu entorno. Assim, três diferentes arranjos de tubulações de referência foram utilizados em Vp para avaliar repostas dos seus respectivos volumes de lixiviados (Qg) e concentrações de compostos físico-químicos e biológicos ($p < 0.05$). Os resultados comparativos de Qg não foram significativos para os diferentes arranjos geométricos de tubos propostos sob influência hidrológica de um ano climático típico ($p > 0.05$), sugerindo elevada similaridade de Qg nos referidos cenários. Assim, confirmou-se a hipótese de independência do arranjo geométrico das tubulações sobre Qg e concentração de compostos produzidos. Concluímos que o método de simulação proposto pode ser recomendado para análises similares, sugerindo que múltiplos cenários são extremamente replicáveis em concepção de projetos atuais e futuros na Amazônia.

Palavras-chave: Lixiviado; Arranjos de drenagem; Simulação; Geração de compostos.

Modeling of leachate and compounds generated in a controlled landfill drainage system in Macapá/Brazil

In Brazil, sanitary landfills (LF) present a significant and historical implementation deficit. Recently, by legal imposition, LF projects have been required to overcome the serious scenario of inadequate solid waste disposal in municipalities. In the Brazilian Amazon, conception and operation studies based on the analysis of relevant physical, chemical and biological variables are still rare. However, despite the scarcity of data on LF in the Amazon, recent scientific advances in computer modeling and simulation can be useful to approach the problem from new perspectives, for instance, from the analysis and optimization of processes applicable in LF projects (Vp) and operation. In the present research, LF leachates were analyzed in the city of Macapá/Brazil, using multiple models and systems analysis (MODUELO). Systematic analyzes of the relevant Controlled Landfill (LFC) design and operation parameters were carried out through mass and energy balances using local data and common parameters applied in similar cases in the literature. In the second stage, we statistically tested three simulated scenarios about the complex system of leachate flows and its potential impacts on the LF and its surroundings. Besides, three different reference piping arrangements were used in Vp to evaluate responses of their respective leachate volumes (Qg) and concentrations of physicochemical and biological compounds ($p < 0.05$). But the comparative Qg results were not significant for the different geometric arrangements of pipes proposed under the hydrological influence of a typical climatic year ($p > 0.05$), suggesting a high similarity of Qg in these scenarios. We conclude that the hypothesis of independence of the geometric arrangement of the pipes on Qg and concentration of produced compounds was confirmed. Therefore, the proposed simulation method can be recommended for similar analyses, suggesting that multiple scenarios are potentially replicable in actual and future designing projects in the Amazon.

Keywords: Leachate; Drainage arrangements; Modeling; Compounds generation.

Topic: **Tecnologia, Modelagem e Geoprocessamento**

Received: **04/08/2021**

Approved: **29/08/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Carlos Armando Reyes Flores 

Universidade Federal do Amapá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3799505317250035>
<http://orcid.org/0000-0003-2973-1686>
reyesfcarlos@gmail.com

Alan Cavalcanti da Cunha 

Universidade Federal do Amapá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2181817533284030>
<http://orcid.org/0000-0002-1846-9486>
alancunha12@gmail.com

Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha 

Universidade Federal do Amapá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3443290397582063>
<http://orcid.org/0000-0001-7101-9305>
helenilzacunha@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0045

Referencing this:

REYES, C. A. F.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A... Modelagem de lixiviados e compostos gerados em sistema de drenagem de aterro controlado de Macapá/Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.8, p.568-582, 2021. DOI:

<http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0045>

INTRODUÇÃO

Globalmente uma quantidade significativa e crescente de resíduos sólidos urbanos (RSU) é descartada em LF, por ser a alternativa tecnológica mais recomendada de destinação final ambientalmente adequada, configurando-se atualmente como a última e inevitável etapa na gestão de resíduos sólidos (DAJIC et al., 2016). Assim, a adoção dessa tecnologia se tornou uma meta importante a ser alcançada pelos países, como os EUA, Europa, entre outros (MELO, 2020), inclusive o Brasil.

Os LF para resíduos sólidos são obras de construção de engenharia em desenvolvimento contínuo. São instalações, por natureza, consideradas como áreas de risco, produzindo diversos impactos negativos no ambiente, como poluição do solo, atmosfera e dos recursos hídricos, com elevada capacidade de gerar contaminantes líquidos e gasosos (SLACK et al., 2005). Contudo, se corretamente concebidos e operados, também podem ter efeitos positivos, como a contenção de poluentes e a geração de energia a partir do gás metano neles produzidos (BARROS, 2013).

Neste cenário, mesmo com a necessidade de implantação de LF de rejeitos por força de lei, a sua adoção traz uma série de preocupações (MELO, 2020). A produção de um líquido de cor escura e de alto poder poluidor, denominado lixiviado, é um exemplo de coproduto resultante da decomposição microbiológica da massa de RSU aterrada.

Mas o impacto ambiental negativo dos LF pode ser reduzido pela aplicação de tecnologias de proteção no projeto do aterro, se forem utilizados materiais impermeáveis adequados para cobertura inferior e superior. Neste caso, os elementos técnicos mais importantes no projeto de um LF são os detalhes sobre os requisitos e recomendações para a proteção da água e do solo (DAJIC et al., 2016).

O projeto ideal de LF é, portanto, uma questão complexa e ainda sem solução. Durante a elaboração do projeto e operação de um aterro, várias variáveis devem ser definidas, incluindo a altura da camada do aterro, a espessura da cobertura intermediária entre as camadas (se houver) e o material utilizado, além do nível de compactação do resíduo ou tipologias de sistemas de extração de lixiviado (CUARTAS et al., 2018). Este último também conhecido como sistema de drenagem, foco do presente estudo.

Os principais processos que ocorrem em aterros (percolação, escoamento e degradação do chorume e compressão dos sólidos) estão intimamente interligados entre si. Cada variável de projeto influencia todas as demais. Portanto, é difícil levar em consideração simultaneamente todas essas interações para otimizar o projeto geral do aterro. Por exemplo, se a intenção é explorar o comportamento das variáveis envolvidas é possível estudar o potencial aumento das camadas de resíduos para determinar se o volume do lixiviado gerado (Q_g) é reduzido no espaço ocupado pelas coberturas intermediárias. As consequências dessa mudança na geração de energia ou na quantidade de poluentes, representada pelos compostos químicos gerados no processo de decomposição microbiológico, devem ser também investigadas (PADILLA, 2007; TOZETTO, 2008; ALÉM SOBRINHO et al., 2009).

Além disso, as condições geográficas e hidroclimáticas presentes em um local específico afetam significativamente essas interações, influenciando os critérios e parâmetros de projeto para diferentes

localidades (CUARTAS et al., 2018). Tanto que, na literatura, há vários estudos que analisam variáveis de projeto, principalmente do ponto de vista empírico, utilizando-se de testes de laboratório e de modelos de escala real e piloto.

Embora alguns resultados interessantes tenham sido obtidos na literatura, vários autores destacam a dificuldade envolvida em tentar extrapolar os resultados laboratoriais diretamente para a realidade (DAJIC et al., 2016). Além disso, células piloto em escala real têm sido construídas e monitoradas para obter dados que permitem a análise da influência das variáveis de projeto (MIJARES et al., 2012; SARAVANATHIIBAN et al., 2014). Embora hoje em dia seja possível partilhar, comparar e integrar essas experiências no mundo globalizado da informação, estas iniciativas continuam sendo um método de trabalho de alto custo e de difícil replicação devido ao elevado número de variáveis físicas, químicas e biológicas envolvidas nos processos de produção de lixiviado (ALÉM SOBRINHO et al., 2009; CUARTAS et al., 2018).

Um agravante destas limitações são os incipientes e raros estudos sobre o tema, principalmente sobre processos hidrológicos e produção de lixiviados em LF na Amazônia. Mas é relevante frisar que muitos dos parâmetros de análise utilizados nas regiões sul e sudeste do Brasil, geralmente aplicados sem muito critério comparativo, podem não ser adequados aos do clima da Amazônia, pois este evidentemente é muito diferenciado do restante do Brasil em termos de precipitação e balanço hídrico (PADILLA, 2007; TOZETTO, 2008; FELDHAUS, 2019; FLORES et al., 2021a).

No entanto, a computação científica permite analisar um grande número de cenários de forma mais rápida, barata e segura do que com os métodos tradicionais de prototipagem e experimentação (DENNING et al., 2000). Recentemente, vários autores têm proposto modelos matemáticos que permitem obter descrições aproximadas dos processos envolvidos nos aterros, como é o caso do MODUELO (LOBO et al., 2007a; 2007b).

O presente estudo analisa os processos mais prováveis de produção de lixiviado potencialmente evidentes no LFC de Macapá/Brasil. Com este propósito foi utilizado o software MODUELO, aplicado ao presente estudo de caso do LFC de Macapá. O LFC de Macapá encerrou operacionalmente suas atividades em 2011, momento em que consideramos a máxima produção teórica de lixiviado Q_g . Neste caso, o objetivo principal foi simular o lixiviado produzido e quantificar sua influência nos diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos (DQO, DBO, H_2 , CH_4 , CO_2 , NH_3) previstos em projeto (Tabela S1 de parâmetros de controle resultantes da simulação). Neste caso, foram testados estatisticamente três cenários de simulação usando diferentes desenhos geométricos dos sistemas de drenagem, nas quais foram avaliadas as significâncias da variação de Q_g e das concentrações de compostos físico-químicos gerados pelo processo de produção de lixiviado.

Nossa principal hipótese de estudo é que, independentemente do desenho do seu sistema de drenagem, a produção de lixiviado e a composição físico-química dos produtos resultantes dos processos físicos, químicos e biológicos envolvidos, não apresentam diferenças significativas de Q_g ($p > 0,05$). Sua relevância está relacionada com o fato das informações básicas de projetos sobre esses arranjos na Amazônia são geralmente desconhecidas. Contudo, serem mais facilmente replicáveis regionalmente.

Tabela S1: Parâmetros de controle resultantes da simulação.

Parâmetro de controle	Unidade
Volume do lixiviado (volume)	m ³
Demanda química de oxigênio (COD)	mg O ₂ /L.
Demanda bioquímica de oxigênio (BOD)	mg O ₂ /L.
Carbono de compostos intermediários dissolvido (DCcho)	kg
Hidrogeno de compostos intermediários dissolvido (DHcho)	kg
Oxigeno de compostos intermediários dissolvido (DOcho)	kg
Acetato dissolvido (DAC)	kg
Nitrogênio amoniacal dissolvido (DNH ₃)	kg
Sulfuro de hidrogênio dissolvido (DSH ₂)	kg
Dióxido de carbono dissolvido (DCO ₂)	kg
Hidrogeno dissolvido (DH ₂)	kg
Metano dissolvido (DCH ₄)	kg
Nitrogênio dissolvido (DN ₂)	kg
Oxigênio dissolvido (DO ₂)	kg
Cinzas dissolvidas (DASH)	kg
Carbono não biodegradável dissolvido (DCnb)	kg
Hidrogeno não biodegradável dissolvido (DHnb)	kg
Oxigênio não biodegradável dissolvido (DONb)	kg
Nitrogênio não biodegradável dissolvido (DNnb)	kg
Enxofre não biodegradável dissolvido (DSnb).	kg
Precipitação total	mm
Volume total de precipitação	m ³
Precipitação evaporada	m ³
Área superficial evaporada	m ³
Infiltração	m ³
Volume absorvido	m ³
Escoamento superficial conectado	m ³
Água superficial total	m ³
Conteúdo de umidade total na camada	m ³
Evapotranspiração potencial	mm

O presente estudo é o primeiro realizado no Estado do Amapá com ênfase nesta abordagem computacional aplicada em LFC. Portanto, sua importância está relacionada com o desenvolvimento de estudos ambientais e de engenharia similares no restante da Amazônia (FLORES et al., 2021a). Além disso, consiste em que parte do quantitativo de RSU no Brasil ainda está sendo destinada às unidades de tratamento ou disposição final inadequadas (lixões e LFC), sendo por imposição legal e inevitável a instalação de inúmeras unidades de LF no país até 2024 (BRASIL, 2020).

As informações quantitativas e qualitativas obtidas para os sistemas de drenagem propostos para a produção de lixiviados e compostos físico-químicos gerados no sistema de LFC de Macapá foram então testados a partir de um sistema inteligente de suporte à tomada de decisão (MODUELO). Esta análise poderá ser utilizada como suporte ao gerenciamento integrado de RSU, enfatizando-se a destinação final dos lixiviados e suas fases de tratamento final, em face da construção de novas células para atender à crescente demanda de RSU, não somente no Estado do Amapá (Macapá), nos demais municípios com demandas significativas, como Santana e Mazagão, mas também em outras regiões da Amazônia com problemas similares.

O potencial suporte técnico para operadores, gestores e usuários, servirá para otimizar balanços de massa resultantes de processos biológicos nos sistemas de drenagem instalados, geralmente pouco estudados e compreendidos, independentemente do desenho previsto em projeto de engenharia. Sua importância também está relacionada com o aumento ou redução da produção de lixiviados sazonalmente

e seus riscos associados às subestimativas de precipitação em eventos climáticos adversos e cada vez mais frequentes na Amazônia. Deste modo, o conhecimento sobre os fluxos hídricos e a disposição geométrica das tubulações representaria a identificação específicas de processos hidrológicos no LFC durante fases críticas que incorressem potencialmente em maiores riscos de impactos ambientais nas vizinhanças, os quais são dependentes das variações climáticas e consequentemente da produção de Q_g e seus coprodutos resultantes.

METODOLOGIA

Método proposto

O objetivo do método proposto é modelar e simular a produção de lixiviado Q_g para três diferentes cenários com diferentes desenhos geométricos do sistema de drenagem, testados estatisticamente. Após a simulação de cada cenário, uma vez obtida Q_g e a composição do lixiviado, novas informações foram então obtidas com o objetivo de avaliar suas variações, a ordem de grandeza dessas variáveis (Tabela S1) e o seu nível de conformidade com a legislação brasileira (ABNT, 2004a).

A metodologia proposta foi estruturada em seis etapas (Figura 1): configuração do modelo base, definição de cenários, geração das variações geométricas do modelo base, simulação dos modelos, geração e análise de resultados (LOBO et al., 2007a; 2007b; CUARTAS et al., 2018).

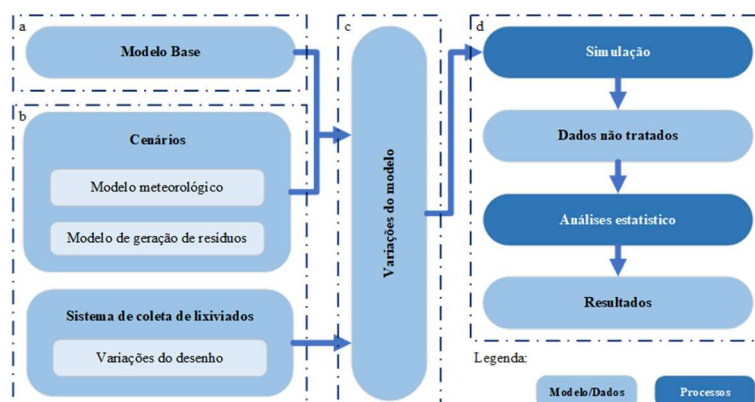


Figura 1: Etapas da metodologia utilizada. Fonte: Adaptado de Cuartas et al. (2018).

Legenda: a) parametrização do modelo; b) cenários, desenho de sistema de coleta de lixiviado e coprodutos e c) variações do modelo; d) simulação, análise estatística e resultados.

Na primeira etapa (a) é necessário parametrizar o modelo base. Isto ocorre a partir das informações do terreno do LFC em estudo. As variáveis de projeto são aquelas realizadas por decisões tomadas ao projetar ou operar uma instalação. São eles, no caso dos aterros de RSU, a intensidade com que os resíduos são compactados depois de despejados (ABNT, 2004b; 2004c), a altura da camada de resíduos ou os sistemas utilizados para cobrir cada camada até a próxima a ser despejada (CUARTAS et al., 2018). Estas e outras variáveis foram consideradas em MODUELO (2018) para criar o modelo base. Isto é, as mesmas sem alteração causada pela falta de disponibilidade de dados. No modelo base é representada a instalação real do LFC de Macapá. Todavia não são considerados os sistemas de drenagem reais, pois estes não estão disponíveis localmente, ou na literatura, até o momento da finalização da presente pesquisa.

Na segunda etapa (b), os cenários representativos foram definidos. Incluiu-se aspectos climáticos da estação meteorológica de Fazendinha (0° 3' S, 51° 6' 36" W, altitude 14.46 m) com uma série histórica de 50 anos (MOREIRA et al., 2020; FLORES et al., 2021b). Além disso, foram considerados as entradas de diversos padrões de geração de resíduos, relacionados com estudos da composição gravimétrica dos mesmos, os quais dependem da população (SEMA, 2001) assim como do volume da pilha de RSU.

Na mesma etapa, foram criadas as variações do desenho do sistema de drenagem. Neste caso, foram consideradas condicionantes físicas típicas de projeto (inclinação da drenagem, número de células servidas pelo dreno, inclinação da camada em direção ao dreno, condutância hidráulica equivalente sob o dreno, diâmetro do tubo, e coeficiente de Manning). Portanto, a hipótese é que não ocorram variações ou alterações significativas na produção Q_g devido às suas diferentes distribuições geométricas na pilha de resíduos. Estas variações combinadas com os cenários utilizados foram geradas sobre o modelo de base. Uma variação do modelo inclui um valor possível para a variável do projeto estudada (variações do sistema de coleção de lixiviados).

O terceiro passo (c) foi definir as variáveis de saída, denominadas de parâmetros de controle que quantificam os impactos produzidos pelo sistema. Estes foram os compostos físico-químicos e a geração Q_g (Tabela S1) que podem ser quantificadas como o volume total durante o período considerado (ano de 2011, data de encerramento do LFC). Isto representa o valor máximo diário ou mensal potencialmente alcançado, de modo que se possam estimar capacidades máximas de armazenamento (ABNT, 2004a; 2004b; CUARTAS et al., 2018). Uma vez definido tais parâmetros de controle, foi necessário simular os balanços hídricos e as cargas para cada distribuição geométrica do modelo e assim obter valores de saída para cada cenário de arranjos de tubulações de drenagem.

A última etapa (d) foi analisar estatisticamente as informações geradas de cada parâmetro de controle. Assim, foi aplicado o método de correlação de Pearson (EDJABOU et al., 2017) que permitiu estimar a influência relativa dos arranjos geométricos dos sistemas de drenagem sobre um determinado conjunto de parâmetros de controle estabelecido, quando um ajuste linear fosse possível. Adicionalmente foi realizada uma análise de componentes principais (PCA), objetivando complementar e filtrar as correlações dos principais parâmetros de controle. A PCA é subdividida em dois eixos explicativos (horizontal e vertical).

Além disso, foi aplicado o teste de kruskal wallis (FLORES et al., 2021a) e o teste de Tukey (ARYA et al., 2021) para determinar a dependência da variável do projeto com os parâmetros de controle simulados. Em resumo, representações gráficas dos resultados da simulação auxiliaram a visualização dos resultados estatísticos e posterior análise, a partir dos quais foram obtidas as variações temporais das variáveis analisadas (dinâmica temporal das múltiplas variáveis estudadas, principalmente Q_g).

Software de simulação – MODUELO

Para o presente estudo de caso, o software MODUELO versão 4 (HERNÁNDEZ, 2012) as simulações dinâmicas para aterros de RSU consideram principalmente os processos hidrológicos, biodegradação e compactação, integradamente. O software representa tridimensionalmente o LFC, sendo composto por

camadas com espessuras similares ou variadas, as quais são compostas por células. Nas simulações também foram utilizados dados padrão da morfologia de aterro (elevação do aterro) (Figura 2) e modos de operação.

As condições hidrometeorológicas locais foram inseridas com base em dados da Estação Fazendinha considerando a umidade relativa (79%), temperatura máxima (28,9^o), mínima (26,9^o) e média (27,5^o), Insolação (7,0h), velocidade do vento (1,9 m s⁻¹), e precipitação diária (FLORES et al., 2021b). As características dos resíduos depositados foram obtidas da composição gravimétrica dos resíduos de Macapá (SEMA, 2001). Deste modo, o aplicativo simulou a operação do LFC até seu fechamento, ao longo de um ano climático típico (2011) (MOREIRA et al., 2020). As séries temporais foram estimadas a partir de variáveis globais em estudos similares da literatura (produção de lixiviados Q_g e compostos físico-químicos) (CUARTAS et al., 2018). As principais variáveis monitoradas foram o volume de resíduos, teor de umidade global, vazão e qualidade do lixiviado, composição ou nível de compactação médio de resíduos e volume de gás (CH₄ e CO₂, entre outros) (Tabela S1).

Os valores do estado operacional do aterro em cada célula discretizada (detalhe de camadas e células do LFC) foram então registrados. Na presente análise não houve necessidade de detalhar os aspectos físicos de cada elemento por não ser o foco de estudo (Figura 2).

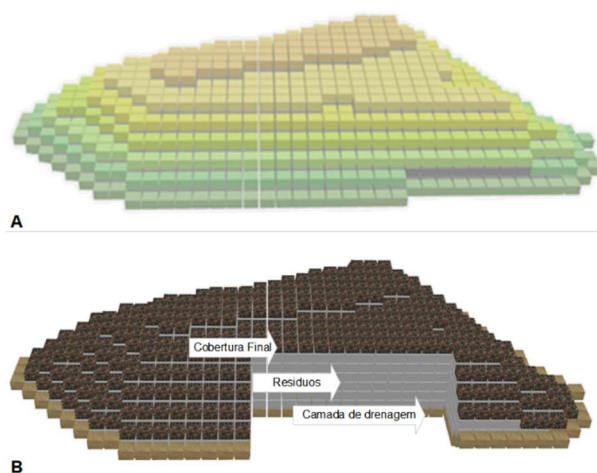


Figura 2: A) Morfologia e B) discretização numérica do modelo base (cobertura final, resíduo e camada drenante).

Estudo de caso- LFC Macapá/Amapá/Brasil

O LFC de Macapá está localizado no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR/AP), à margem esquerda da rodovia BR-156, no sentido Macapá-Oiapoque, no km 14, a partir da confluência desta rodovia com a AP-070-AP. Distante 3,5 km do rio Matapi. Seu limite sul está a 13 km da pista do Aeroporto Internacional de Macapá, a 20 km distância da área central urbana da capital e a 4,7 km da foz do Igarapé Jandiá (Figura S1).

A área total destinada ao empreendimento (CTR/AP) é de aproximadamente 103,00 ha. A área afetada pela disposição dos diversos tipos de resíduos (domésticos, comerciais, entulhos, serviços de saúde, pneus) está estimada em 35,70 ha. A área ocupada pela vegetação nativa é de 58,70 ha e aproximadamente 36,0 ha é a área de intervenção. A célula remediada do LFC para os resíduos sólidos domésticos e outros apresenta uma área de 50.124,33 m².

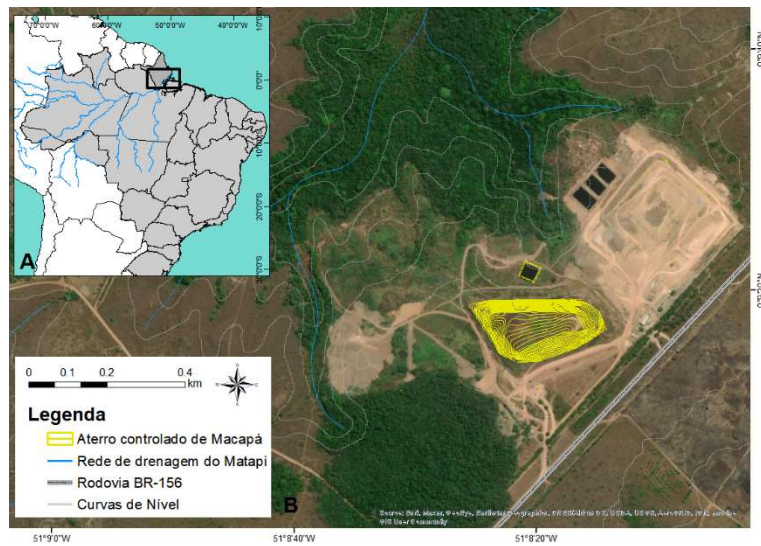


Figura S1: a) Localização geográfica na América do Sul e no Brasil, b) localização do aterro controlado de Macapá (área de estudo).

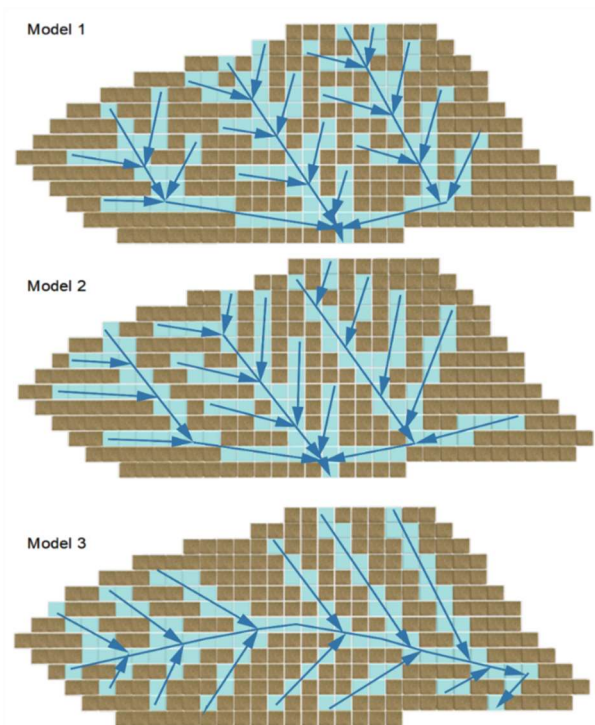


Figura 3: Variações dos desenhos do sistema de drenagem (sem escala): 1) planta com arranjo ramificado a; 2) planta com arranjo ramificado b e 3) planta com arranjo espinha de peixe.

Assim, para testar a metodologia descrita, foi analisado um caso hipotético, de modo que os resultados pudessem ser interpretados com facilidade e, assim, comparar impactos dos diferentes desenhos geométricos do sistema de drenagem (Figura 3), especialmente os parâmetros mais relevantes de controle (Tabela S1).

Além do volume de lixiviado Q_g , os principais compostos físico-químicos e biológicos considerados como parâmetros de controle relevantes influenciados pelas variações geométricas do sistema de drenagem, foram: demanda química de oxigênio (COD), demanda bioquímica de oxigênio (BOD), carbono de compostos intermédios dissolvido (DCcho), hidrogênio de compostos intermediários dissolvido (DHcho), Oxigênio de compostos intermédios dissolvido (DOcho), acetato dissolvido (DAC), nitrogênio amoniacal dissolvido

(DNH₃), sulfeto de hidrogênio dissolvido (DSH₂), dióxido de carbono dissolvido (DCO₂), hidrogênio dissolvido (DH₂), metano dissolvido (DCH₄), nitrogênio dissolvido (DN₂), oxigênio dissolvido (DO₂), carbono não biodegradável dissolvido (DCnb), hidrogênio não biodegradável dissolvido (DHnb), oxigênio não biodegradável dissolvido (DONb), nitrogênio não biodegradável dissolvido (DNnb) e enxofre não biodegradável dissolvido (DSnb) (Tabela S1) (LOBO et al., 2008; LÓPEZ et al., 2012).

RESULTADOS

Para cada parâmetro de controle utilizado nas simulações foram obtidos 365 resultados diários ao longo do ano de 2011, como referência ao cenário operacional mais adverso e crítico possível. Cada desenho corresponde a uma combinação distinta do sistema de drenagem e um diferente cenário (Figura 3), sobre o qual então os parâmetros foram ajustados para cada modelo de regressão linear múltipla.

O teste estatístico multicomparativo não paramétrico (Kruskal-Wallis) (Tabela 1) sugere que, independentemente do desenho geométrico da drenagem, os cenários de variações de produção de Q_g e produtos dos processos biológicos não foram significativas (p>0,05). Isso sugere uma elevada “homogeneidade” dos processos envolvidos. Neste caso, confirma-se a hipótese de que não há significância entre as saídas dos parâmetros de controle resultante dos balanços ou fluxos, independentemente da variação geométrica dos arranjos no modelo. Isto significa que o desenho das tubulações nos sistemas de drenagem não afeta a produção de lixiviados Q_g, nem a composição ou produção de compostos físico-químicos e biológicos resultantes desses processos no tempo (Tabela S1).

Tabela 1: Teste multicomparativo de Kruskal-Wallis e significâncias na produção de lixiviados e coprodutos do LFC de Macapá /Amapá-Brasil

Variável dependente	Saída do Modelo	Testes comparativos múltiplos entre parâmetros do MODUELO							
		Tukey			Kruskal-Wallis				
		Model 1	Model 2	Model 3	Coeff. (%)	Variation	X ² (chi-squared)	DF	p-value (<0.05)
Variáveis independentes	Volume	453,13 ^a	454,19 ^a	453,7 ^a	103,12	0,008		2	NS
	COD	2072,58 ^a	2075,27 ^a	2060,75 ^a	64,64	0,561		2	NS
	BOD	1736,19 ^a	1738,15 ^a	1726,53 ^a	63,34	1,208		2	NS
	DCcho	136,02 ^a	135,96 ^a	135,3 ^a	130,97	0,037		2	NS
	DHcho	16,41 ^a	16,4 ^a	16,32 ^a	130,97	0,037		2	NS
	DAC	48,42 ^a	48,42 ^a	48,12 ^a	144,06	0,042		2	NS
	DNH ₃	11,14 ^a	11,13 ^a	11,07 ^a	136,90	0,037		2	NS
	DSH ₂	1,95 ^a	1,95 ^a	1,94 ^a	136,91	0,037		2	NS
	DCO ₂	5,69 ^a	5,7 ^a	5,68 ^a	119,96	0,021		2	NS
	DH ₂	0,00 ^a	0,01 ^a	0,00 ^a	149,89	0,031		2	NS
	DCH ₄	0,04 ^a	0,04 ^a	0,04 ^a	128,17	0,006		2	NS
	DN ₂	0,03 ^a	0,03 ^a	0,03 ^a	148,28	0,095		2	NS
	DO ₂	11,14 ^a	11,13 ^a	11,07 ^a	136,90	0,105		2	NS
	DCnb	26,41 ^a	26,41 ^a	26,26 ^a	136,90	0,037		2	NS
	DHnb	3,55 ^a	3,55 ^a	3,53 ^a	136,90	0,037		2	NS
	DONb	22,22 ^a	22,22 ^a	22,09 ^a	136,90	0,037		2	NS
DNnb	1,11 ^a	1,11 ^a	1,11 ^a	136,90	0,037		2	NS	

[(*) significativo, (NS) = não-significante]

A matriz de coeficientes de correlação entre os parâmetros de controle envolvidos (Figura 4) indica que o COD e BOD apresenta correlação negativa e moderada com o Volume de lixiviado Q_g, nitrogênio (DN₂) e oxigênio (DO₂) presentes no LFC. Se houver aumento de COD ou BOD ocorrerá uma provável redução do

volume de lixiviado Q_g . O Gráfico complementar de PCA (Figura S2) mostra essa mesma correlação onde \cos^2 de COD e BOD (representados pelos eixos horizontal e vertical da PCA) é maior em relação aos demais parâmetros. A PCA sugere que apenas dois eixos explicam 94,1% da variação global de Q_g .

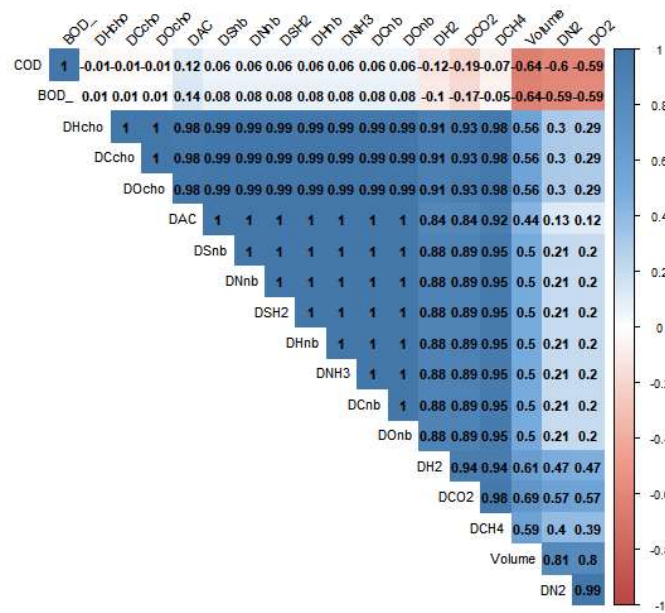


Figura 4: Correlação dos parâmetros de controle para Q_g Legenda: (cores azuis (+) e vermelhas (-)).

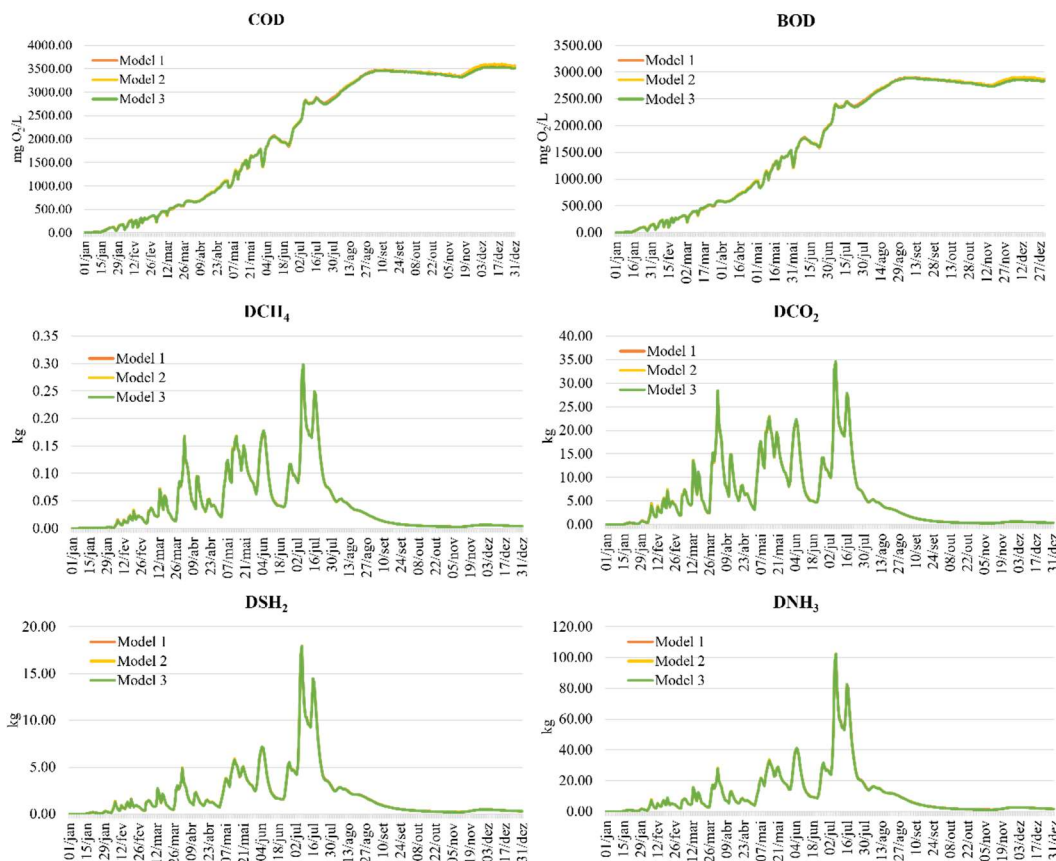


Figura 5: Saídas numéricas para os três cenários hipotéticos com variação temporal dos parâmetros DCH_4 , DCO_2 , DSH_2 e DNH_3 segundo diferentes cenários condicionados à três diferentes arranjos geométricos do sistema de drenagem (LFC – Macapá, 2011).

O gráfico complementar PCA mostrou que BOD e COD ($\cos^2 \approx 0,80$), DO_2 e DN_2 ($\cos^2 \approx 0,83$), estão correlacionados. Por outro lado, o \cos^2 para volume e DH_2 foi próximo de 0,86. Para DCH_4 e DCO_2 o \cos^2 ficou

próximo de 0,91 e para os demais compostos $\cos^2 \geq 0,95$. Além disso, BOD e COD se encontraram no 3º quadrante da PCA, com maior projeção no eixo vertical, diferenciando-se das demais variáveis (quadrantes 1º e 4º). O Volume, DO₂, DN₂, DCH₄, DCO₂ estão concentrados no 4º quadrante e os demais compostos no 1º quadrante. Por outro lado, os compostos (COD, BOD, DCH₂, DCO₂, DSH₂, DNH₃) apresentaram-se com correlações muito próximas para cada modelo (> 95%).

É possível observar nos gráficos da (Figura 5) que os referidos parâmetros são estimados pelo MODUELO com valores realmente muito próximos entre si e praticamente quase sem diferenças na visualização gráfica. Esta observação é novamente corroborada estatisticamente, com a não significância quando estatisticamente comparados (Kruskal-Wallis, Tabela 1).

DISCUSSÃO

As variações geométricas de sistemas de drenagem não apresentaram um impacto significativo nos parâmetros de controle ($p > 0,05$) (Q_g e compostos físico-químicos principais) (Tabela 1 e Figura 4). Em detalhes, a correlação entre os parâmetros de controle foi em grande maioria positiva [$0,01 \leq R \leq 1,0$], com exceção dos parâmetros: DHcho, DCcho, DOcho relacionados a COD ($R = -0,01$) e DH₂, DCO₂, DC₄, Volume, DN₂ e DO₂ relacionados a COD e BOD [$-0,05 \leq R \leq -0,64$]. Onde as correlações entre os compostos: DHcho, DCcho, DAC, DSnb, DNnb, DSH₂, DHnb, DNH₃, DCnb, DONb, DH₂, DCO₂, DCH₄, apresentaram as melhores correlações positivas [$0,84 \leq R \leq 1,0$]. Assim como também a correlação COD~BOD ($R=1,0$) e DN₂~DO₂ ($R=0,99$) e o volume de lixiviado Q_g relacionado com DN₂ ($R=0,81$) e DO₂ ($R=0,80$) apresentaram valores no mesmo intervalo. Além disso, o volume de lixiviado Q_g apresentou correlações negativas medianas ($R = -0,64$) com COD e BOD, sugerindo que provavelmente outros fatores envolvidos influenciam sua variação.

É possível observar que o volume de lixiviado apresenta dependência significativa de DN₂, DO₂ (positivamente), COD e BOD (negativamente), além de influenciar DH₂ (positivamente), e DCO₂ e DCH₄ (negativamente) (PCA) (Figura S2). Embora os dados utilizados para o cálculo destes parâmetros sejam consequência de estimativas do MODUELO, e de acordo com o alcance atual da presente análise, este não permite ainda uma visão geral das possíveis interações entre os compostos e seus potenciais impactos no LFC e o ambiente vizinho. A média gerada em DCH₄ foi 0.04kg para os 3 modelos. Em resumo, para DCO₂ (Model₁=5,69kg, Model₂=5,70kg, Model₃=5,68kg), DSH₂ (Model₁ e Model₂=1,95kg, Model₃=1,94kg) e DNH₃(Model₁=11,14kg, Model₂=11,13kg, Model₃=11,07kg), mostrando que não apresentam significância com variações dos arranjos de drenagem utilizados na análise. Este cenário corrobora o fato de que os três diferentes cenários, em tese, não impactam significativamente nenhuma variável avaliada (Tabela 1).

Os compostos DCH₄, DCO₂, DSH₂, e DNH₃ tendem a apresentar elevação de massa à medida que o período chuvoso se inicia, alcançando massas mais elevadas durante a transição chuvosa para seca (FLORES et al., 2021b). Analisar estes compostos com maior profundidade é necessário porque quando as concentrações de poluentes e a taxa de vazamento do LFC são incertas, é mais difícil prever qual seria a influência efetiva que o sistema de drenagem do aterro teria, por exemplo, nas águas subterrâneas (ZHANG et al., 2021). Nestes casos, seria possível ocorrer um aumento significativo na concentração de metais

atenuados nos sedimentos circundantes quando os aterros forem eventualmente inundados (BRAND et al., 2020). Este cenário seria provável num eventual evento extremos de precipitação.

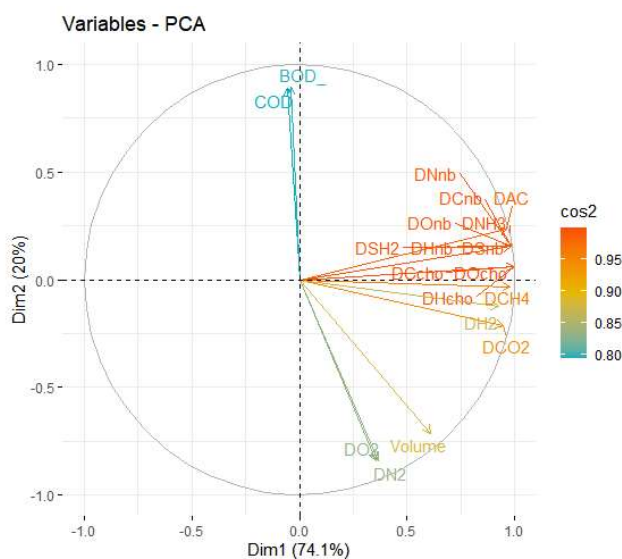


Figura S2: PCA com duas dimensões (eixos) entre os parâmetros de controle.

Por outro lado, como os dados utilizados no MODUELO deveriam ser gerados com dados do próprio local do LFC, atualmente indisponíveis, a presente análise foi fundamentada essencialmente no estudo de Cuartas et al. (2018). Os referidos autores utilizaram dados adicionais da literatura usando o lixiviado produzido como parâmetro de controle frente às variáveis de projeto (altura da camada de resíduos, densidade de compactação do resíduo, espessura da cobertura, revestimento de superfície, e cobertura final, aplicado em um clima cantábrico, aqui adaptado do clima de uma região de Espanha. Naquele caso, a variável com maior influência foi o revestimento superficial durante o período de operação, o que reduz o volume total de lixiviado gerado (com fator de compactação $C = 0,57$). A cobertura intermediária e a cobertura final são secundárias (0,17 e 0,18), com a quantidade de lixiviado reduzida em uma ordem de magnitude inferior. E a proporção de geração de lixiviado Q_g entre cenários climáticos da Cantábria e clima mediterrâneo é de cerca de 2–1 e correspondem aos seus respectivos valores de precipitação (2,87–1,33 mm.dia⁻¹).

MODUELO se baseia em uma discretização numérica tridimensional (3D) sendo inicialmente calibrado e aplicado em um LF na região de Cantabria-España, usando simulação de produção de lixiviados como variável principal, o qual foi comparado com o modelo HELP (LOBO et al., 2003). Os referidos autores consideraram também variáveis hidrológicas (ALIBARDI et al., 2018), sobre as quais foi apresentado uma defasagem média de aproximadamente sete meses nos valores máximos anuais do fluxo de lixiviado resultantes da simulação HELP em relação aos resultados do MODUELO (LOBO et al., 2007b).

Por outro lado, considerar diferentes cenários é importante para determinar o impacto de múltiplas variáveis presentes no projeto. Por exemplo, em um clima Cantábrico houve influência da cobertura intermediária temporária na variabilidade do lixiviado gerado. Sendo que essa variabilidade diminui em resíduos europeus, e para os não europeus a variabilidade aumenta (CUARTAS et al., 2018). Mas, no estudo de caso, ficou claro que as variações geométricas do sistema de drenagem aparentemente não influenciam na variabilidade do lixiviado gerado, como mostrado na Figura 5. Além disso, as simulações indicam que não

há impacto diferenciado sequer na composição dos compostos físico-químicos e biológicos que podem impactar o ecossistema Amazônico (Tabela 1).

Esses resultados revelam também a necessidade de se analisar diferentes cenários para generalizar algumas conclusões. Por exemplo, no bioma amazônico, onde foram despejados 2018 cerca de 1.700.000 t ano⁻¹ de resíduos nos rios e afluentes (ACTO, 2018), contaminando corpos da água e florestas (RAMÍREZ, 2016), é possível replicar o método usado na presente pesquisa adicionando novas variáveis em LFC e LF para verificar se o clima Amazônico não influi na geração de lixiviados ($p < 0.05$) ao longo de diferentes estações sazonais. Por exemplo, a produção de Q_g e CH_4 (entre outros gases de efeito estufa) podem ser globalmente muito relevante porque o bioma amazônico sequestra entre 150-200 Gt C ano⁻¹, aproximadamente metade de todo o carbono presente em florestas tropicais (ACTO, 2018; PEREIRA et al., 2020; Tigre, 2016).

Assim, este método permite avaliar o papel dos principais processos hidrológicos que contribuem com os fluxos de lixiviado coletado pelo sistema de drenagem e suas condições de biodegradação (LOBO et al., 2007a) nos LFC e LF. E como o modelo analisa com facilidade esses fenômenos, permite sua aplicação como ferramenta de gestão e fiscalização de LFC e LF. Assim, fica demonstrado sua potencialidade, uma vez que o método proposto neste e outros estudos (LOBO et al., 2002; LOBO et al., 2007a; PADILLA, 2007; TOZETTO, 2008; CUARTAS et al., 2018) servem genericamente de base em estudo, projeto e operação de LF.

O método também se apresenta como suporte à tomada de decisões e identificação de melhores práticas de otimização de processos, como o aproveitamento do gás CH_4 gerado. Sendo lucrativo ou não, os efeitos de diferentes alternativas de operação do LF e material de cobertura, o modelo pode ser utilizado para estimar o impacto causado pelas emissões geradas no longo prazo, tanto na fase de operação quanto na fase de pós-auditoria, análise de reciclagem de chorume e outras estratégias de remediação, como a detecção de falhas no sistema de proteção (LOBO et al., 2002).

CONCLUSÕES

Esta pesquisa é inédita para estudos de simulação de LFC na Amazônia. Na pesquisa foram testados estatisticamente os principais resultados de potenciais impactos da variação de arranjos geométricos de sistemas de drenagem sobre o volume de lixiviado produzido e os compostos físico-químicos e biológicos gerados no período de fechamento do LFC em 2011, em tese, durante a máxima produção de lixiviados.

Confirmamos a hipótese de independência do arranjo geométrico do sistema de drenagem proposto em projeto para construção de LF sobre Q_g . Assim, as variações dos fluxos hídricos e de lixiviados ou coprodutos simulados não foram significativas ($p > 0,05$). A relevância destes resultados serve como referência para outros estudos na Amazônia, onde as informações sirvam de base para outros projetos de LFC e LF similares onde praticamente inexistentes informações sobre parâmetros de projeto básicos.

A não significância entre os diferentes parâmetros de controle sugere maior liberdade aos projetistas quanto aos arranjos e distribuição dos tubos de drenagem nas células do LFC em situações similares. Portanto, a modelagem e a simulação numérica são excelentes alternativas para explorar novas linhas de estudo na Amazônia, cujas características hidroclimáticas são espacialmente similares, o que se refletiria

também em resultados similares na estimativa de Q_g (e parâmetros de controle) em nível regional.

O estudo é inédito em estimar variações dos fluxos hídricos e variações de concentrações de compostos presentes no sistema de drenagem na Amazônia. Em especial, com foco na otimização e monitoramento das variáveis de operação (parâmetros de controle), é de fato uma abordagem útil na construção de novas hipóteses científicas e na tomada de decisões do setor, com a identificação dos efeitos das variações de parâmetros e como subsídio à operação e otimização desses sistemas.

Contudo algumas limitações deverão ainda ser superadas em estudos similares futuros no Estado do Amapá (e na Amazônia). No entanto, é necessário dispor de parâmetros monitorados em escala real (LFC de Macapá). E, apesar de inúmeras tentativas, a Prefeitura Municipal de Macapá não disponibilizou as informações necessárias para uma eventual calibração ou validação das saídas numéricas do presente estudo de caso. Por outro lado, um dos objetivos principais do estudo foi obter uma linha de base para avaliar os parâmetros pré-condicionados a serem calibrados futuramente, visando sua validação a partir de série de dados localmente disponíveis. Assim, os detalhes dos balanços de massa dos constituintes resultantes dos processos físicos, químicos e biológicos não foram exaustivamente explorados, nem seus potenciais impactos ambientais nas vizinhanças do LFC. Todavia a ferramenta apresenta potencial se dispuser desses dados.

Todos esses processos necessitam ainda ser testados com dados locais, fundamentais para o monitoramento e gestão do sistema de LCF no tempo. Não somente em Macapá, mas também aplicáveis ao planejamento operacional, gestão e fiscalização em outras localidades da Amazônia.

AGRADECIMENTOS: Ao Programa de Alianças para a Educação e a Capacitação (PAEC - OEA – GCUB), com bolsa país - programa CAPES/PPGCA-UNIFAP, processo nº. 88882.441452/2019-01; CNPq: Processo Nº 309684/2018-8), ao Projeto Tedplan (Planos Municipais de Saneamento Básico) FUNASA/UNIFAP, a Propespg/UNIFAP, ao Grupo de Ingeniería Ambiental da Universidad de Cantabria por disponibilizar o software MODUELO V.4.0 especialmente a Amaya Lobo. Ao laboratório de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQSMSA) e ao chefe da Divisão de Monitoramento e Limpeza da Semur, Adrian Castelo, por proporcionar o mapa de curvas de nível do LFC.

REFERÊNCIAS

ALÉM SOBRINHO, P.; POVINELLI, J.; GOMES, L. P.. **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. p.19–25.

ALIBARDI, L.; COSSU, R.. Leachate Generation Modeling. In: **Solid Waste Landfilling**. Elsevier, 2018. p.229–245. DOI: <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-407721-8.00013-9>

ACTO. Amazon Cooperation Treaty Organization. **Análisis Diagnóstico Transfronterizo Regional de la Cuenca Amazónica – ADTA532**. Brasília: Proyecto GEF Amazonas, 2018.

RYA, S.; PATEL, A.; KUMAR, S.; PAU-LOKE, S.. Urban mining of obsolete computers by manual dismantling and waste

printed circuit boards by chemical leaching and toxicity assessment of its waste residues. **Environmental Pollution**, v.283, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117033>

BRAND, J. H.; SPENCER, K. L.. Will flooding or erosion of historic landfills result in a significant release of soluble contaminants to the coastal zone?. **The Science of the Total Environment**, v.724, p.138150, 2020. DOI:

<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138150>

HERNÁNDEZ, M. C.. **Universidad de cantabria departamento de matemática aplicada y ciencias de la computación: Tesis Doctoral Optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basada en modelización**. 2012.

- CUARTAS, M.; MARTÍNEZ, A. L.; PÉREZ, F.; CORTÁZAR, A. L. G.. Analysis of landfill design variables based on scientific computing. **Waste Management**, v.71, p.287–300, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.043>
- DAJIĆ, A.; MIHAJALOVIC, M.; JOVANOVIĆ, M.; KARANAC, M.; STEVANOVIĆ, D.; JOVANOVIĆ, J.. Landfill design: Need for improvement of water and soil protection requirements in EU Landfill Directive. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.18, n.3, p.753–764, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10098-015-1046-2>
- DENNING, P. J.; RALSTON, A.; HEMMENDINGER, D.. **Computer science: the discipline**. 2000.
- EDJABOU, M. E.; MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A.; SCHEUTZ, C.; ASTRUP, T. F.. Statistical analysis of solid waste composition data: Arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients. **Waste Management**, v.69, p.13–23, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.036>
- FELDHAUS, C. R.. **Influência de parâmetros de entrada em modelos de simulação de aterros de resíduos**. 2019.
- FLORES, C. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.. **Indicators of solid waste generation per capita in international amazon countries**. 2021a.
- FLORES, C. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.. **Hydrometeorological characterization to estimate the generation of the sanitary landfill leachate into an urban watershed of East Amazon/Brazil**. 2021b.
- LOBO, A.; MUNOZ, J.; SÁNCHEZ, M. M.; TEJERO, I.. Comparative analysis of three hydrological landfill models through a practical application (MODUELO, HELP and MODUELO 1). In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 9. **Anais**. Cagliari: CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2003.
- LOBO, A. G. D. C.; LANTARÓN, J. H.; FERNÁNDEZ, O. M.; MONZÓN, I. T.; LAMIA, M. F.. Modelling for environmental assessment of municipal solid waste landfills (Part II: Biodegradation). **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v.20, n.6, p.514–528, 2002. DOI: <http://doi.org/10.1177/0734242X0202000605>
- LOBO, A. G. C.; TEJERO, I. M.. Application of simulation models to the diagnosis of MSW landfills: An example. **Waste Management**, v.27, n.5, p.691–703, 2007a. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.04.015>
- LOBO, A. G. C.; TEJERO, I. M.. Moduelo 2: A new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills. **Environmental Modelling and Software**, v.22, n.1, p.59–72, 2007b. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.11.003>
- LÓPEZ, A.; VALLEJOS, R. J. G.; HERNÁNDEZ, M. C.; CORTÁZAR, A. L. G.. Modelización de una celda vertedero experimental con Moduelo 4.0. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, v.28, n.1, p.89–96, 2012.
- MELO, D. A.. **Aterros de Resíduos: O Uso de Ferramentas de Avaliação como Apoio Decisório Para a Reabilitação Ambiental – Teoria e Prática**. Curitiba: Appris, 2020.
- MIJARES, R. G.; KHIRE, M. V.. Field Data and Numerical Modeling of Water Balance of Lysimeter versus Actual Earthen Cap. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.138, n.8, p.889–897, 2012. DOI: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000539](http://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000539)
- MOREIRA, P. H. O.; CUNHA, A. C.; SILVA JÚNIOR, J. A.; COSTA, A. C. L.. Microclimatic variation in urban sites with different levels of vegetable cover as a subsidy to the formation of heat island. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.07, p.3254–3274, 2020. DOI: <http://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3254-3274>
- PADILLA, R. S.. **Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- PEREIRA, J. C.; VIOLA, E.. Close to a Tipping Point? The Amazon and the Challenge of Sustainable Development under Growing Climate Pressures. **Journal of Latin American Studies**, p.467–494, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1017/S0022216X20000577>
- RAMÍREZ, P.. **Identificación de las fuentes de contaminación y su relación con la dinámica del río Itaya (zona baja de Belén), distrito de Belén**. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, 2016.
- SARAVANATHIIBAN, D. S.; KHIRE, M. V.. **Controlled Irrigation to Estimate Field-Scale Hydraulic Conductivity of a Landfill Final Cover**. 2014.
- SEMA. Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Amapá. **Estudo de viabilidade econômica, técnica e operacional de sistemas de reaproveitamento de resíduos sólidos urbanos em Macapá e Santana**. SEMA, 2001.
- SLACK, R. J.; GRONOW, J. R.; VOULVOULIS, N.. **Household hazardous waste in municipal landfills: Contaminants in leachate**. Science of the Total Environment. Elsevier B.V., 2005. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.07.002>
- TIGRE, M. A.. Cooperation for Climate Mitigation in Amazonia: Brazil's Emerging Role as a Regional Leader. **Transnational Environmental Law**, v.5, n.2, p.401–425, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1017/S2047102516000297>
- TOZETTO, C. M.. **Modelagem matemática de aterros sanitários com a simulação hidrológica da geração de lixiviado: Estudo de caso dos aterros sanitários de Curitiba**. 2008.
- ZHANG, J.; ZHANG, J.-M.; XING, B.; LIU, G. D.; LIANG, Y.. Study on the effect of municipal solid landfills on groundwater by combining the models of variable leakage rate, leachate concentration, and contaminant solute transport. **Journal of Environmental Management**, v.292, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112815>