



**XVI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE**  
**15º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES**  
**DE LÍNGUA PORTUGUESA**

**SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE CO<sub>2</sub> DE UM SOLO DO AGRESTE  
PERNAMBUCANO**

*Edevaldo Miguel Alves<sup>1</sup>; João Lucas Vilar de Andrade<sup>2</sup>, José Romualdo de Souza Lima<sup>3</sup>, Manuella Virginia Salgueiro Gondim<sup>4</sup>, Antonio Celso Dantas Antonino<sup>5</sup>*

**RESUMO** – Mudanças climáticas têm recebido grande destaque pela mídia e têm sido frequentemente discutidos pela comunidade científica e diversos estudos indicam crescimento das emissões dos Gases do Efeito Estufa e uma tendência acelerada de aquecimento global para os próximos anos. As emissões antropicas é o principal mecanismos de emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, porém há outros mecanismos que emitem este gás, como por exemplo a respiração do solo, que é a liberação de CO<sub>2</sub> oriunda atividade microbiológica. Contudo, não existem uma quantidade de trabalhos significativos, relativo aos estudos da respiração do solo, e esta escassez de dados faz das simulações computacionais uma ferramenta importante para o estudo de diversos fenômenos naturais. Entre as diversas ferramentas computacionais para estudo de fenômenos hidrológicos destaca-se o Hydrus1D, que é um sistema computacional que simula a dinâmica da água e o transporte de calor, gases e solutos em solos. Destaforma, o objetivo deste trabalho foi estudar a dinâmica da respiração de um solo de caatinga do agreste pernambucano, por meio de modelagem matemática.

**ABSTRACT** – Climate change has received great attention in the media and has been frequently discussed by the scientific community and several studies indicate growth in greenhouse gas emissions and an accelerated trend of global warming for the coming years. Anthropogenic emissions are the main mechanisms of CO<sub>2</sub> emission in the atmosphere, but there are other mechanisms that emit this gas, such as soil respiration, which is the release of CO<sub>2</sub> from microbiological activity. However, there is not a significant amount of work related to soil respiration studies, and this scarcity of data makes computer simulations an important tool for the study of various natural phenomena. Among the various computational tools for the study of hydrological phenomena, Hydrus1D stands out, which is a computational system that simulates the dynamics of water and the transport of heat, gases and solutes in soils. Thus, the objective of this work was to study the dynamics of respiration in a caatinga soil in the Pernambuco agreste region, through mathematical modeling.

**Palavras-Chave** – Caatinga; Hydrus1D; Mudanças Climáticas

<sup>1</sup>) Universidade Federal de Pernambuco – Centro do Agreste.(UFPE-CAA); Av. Mariele Franco S/N, Caruaru-PE, edevaldo.miguel@ufpe.br

<sup>2</sup>) Universidade Federal de Pernambuco – Centro do Agreste.(UFPE-CAA); Av. Mariele Franco S/N, Caruaru-PE, lucas\_11998@hotmail.com

<sup>3</sup>) Universidade do Agreste de Pernambuco (UFAPE); Av Bom Pastor S/N, Boa Vista, Garanhuns – PE, romualdo\_solo@yahoo.com.br

<sup>4</sup>) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Prof. Moraes Rego 1235, Cidade Universitária – PE; manuella.gondi@ufpe.br

<sup>5</sup>) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Prof. Moraes Rego 1235, Cidade Universitária – PE, antonio.antonino@ufpe.br

## 1 – INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os cenários de mudanças climáticas têm recebido grande destaque pela mídia e têm sido frequentemente discutidos pela comunidade científica. Estas mudanças são decorrentes do acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, resultantes de atividades humanas, que são frequentemente apontados como os principais responsáveis pelas mudanças climáticas em curso em nosso planeta. Diveros estudos indicam crescimento das emissões dos GEE e uma tendência acelerada de aquecimento global para os próximos anos e esta tendência estaria principalmente relacionada às alterações na composição dos gases atmosféricos, causadas pelas emissões de atividades antrópicas recentes. Os gases responsáveis pelo efeito estufa são compostos por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), Ozônio ( $\text{O}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Contudo, os processos envolvendo  $\text{CO}_2$  destacam-se em importância, porque este gás representa mais da metade do total das emissões, em termos de seu impacto no balanço de energético. Neste contexto, as regiões áridas e semiáridas tornam-se as mais expostas aos impactos das mudanças climáticas, na qual os processos hidrológicos poderão ser afetados, provocando diferentes tipos de prejuízos para as comunidades que vivem nessas regiões, como a tendência de “aridização” e de mudanças na vegetação, como a caatinga (CIRILO, 2008).

Além das emissões antropicas de  $\text{CO}_2$ , há outros mecanismos que emitem este gás na atmosfera, como a respiração dos animais, atividades de decomposição e a respiração do solo, entre eles está a respiração do solo ( $R_s$ ), que é a liberação de  $\text{CO}_2$  e representa a atividade microbiológica, sendo o somatório das liberações de vários processos que ocorrem na serapilheira, superfície e camadas mais profundas do solo, incluindo: I) A respiração dos microrganismos (bactérias, fungos e arqueas) e macrofauna; II) Os processos fermentativos, que ocorrem em profundidade sob condições de anaerobiose; e III) A oxidação química.

A respiração do solo é muito sensível às alterações do meio, como variações de temperatura, umidade, redução da cobertura do solo e excesso ou ausência de precipitação, que influenciam significativamente as atividades microbiológicas (FERREIRA, 2015), como conclui os estudos realizados por Martins et al. (2012) em solos do semiárido paraibano, mostrando que durante os meses mais úmidos com temperaturas mais baixas, houve um aumento da população bacteriana influenciando positivamente o fluxo de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera.

Contudo, não existem uma quantidade de trabalhos significativos, relativo aos estudos da respiração do solo, e esta escassez de dados faz das simulações computacionais uma ferramenta importante para o estudo de diversos fenômenos naturais. As simulações computacionais de sistemas

físicos estão presentes tanto na área científica quanto na área acadêmica, no desenvolvimento de tecnologia nas áreas da medicina, física, química e engenharia, e na otimização de sistemas de produção (ALVES, 2009). Entre as diversas ferramentas computacionais para estudo de fenômenos hidrológicos destaca-se o Hydrus1D, que é um sistema computacional que simula a dinâmica da água e o transporte de calor, gases e solutos em solos saturados e não saturados, cultivados ou não.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi estudar a dinâmica da respiração de um solo de caatinga do agreste pernambucano, por meio de modelagem matemática com uso do programa hydrus1D.

## 2 – METODOLOGIA

Os dados de solo e de respiração foram oriundo de experimentos realizados na fazenda Riacho do Papagaio, no município de São João, localizado na microrregião de Garanhuns, dentro da mesorregião do agreste meridional do estado de Pernambuco (Figura 1). As coordenadas geográficas da área experimental onde estão instaladas ambas as torres são 8°48'30" de latitude sul e 36°24'00" de longitude oeste, com 687 m acima do nível do mar.

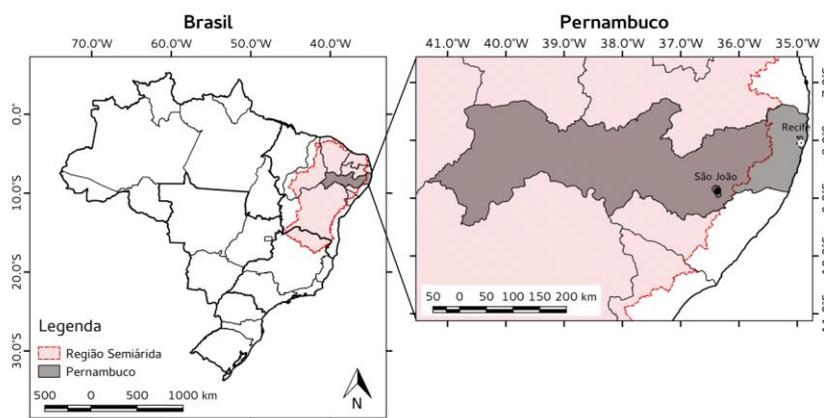


Figura 1 – Localização da área experimental. Município de São João, agreste meridional do estado de Pernambuco

Segundo dados históricos de precipitação da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) de uma estação experimental no município de São João, a precipitação média anual é de 769,64 mm, sendo os meses de maio, junho, julho e agosto o período mais chuvoso e os meses de outubro, novembro e dezembro o período mais seco.

A área de caatinga da fazenda tem aproximadamente 4,0 ha e está a aproximadamente à 50 anos sem sofrer cortes rasos. A caracterização textural e hidrodinâmica do solo foi feita numa malha

quadrada de 100 m de lado, composta por cinco pontos. Neste pontos foram realizados ensaios e coletas de solo na superfície e nas profundidades de 20, 40 e 60 cm. Os dados da caracterização física do solo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Média das frações texturais e densidade do solo das áreas de pastagem e de caatinga.

z (cm)	Fração granulométrica			Classificação do solo	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\varepsilon$ (-)
	Areia	Silte	Argila			
0–20	84,49	13,17	2,34	Areia Franca	1,502	0,426
20–40	80,03	14,12	5,86	Areia Franca	1,705	0,356
40–60	77,13	15,37	7,50	Franco-Arenoso	1,833	0,310

Fonte: ALVES (2015)

O modelo de simulação matemática Hydrus1D pode ser usado para analisar o movimento da água, soluto e gases em meios porosos não saturados, parcialmente saturados ou totalmente saturados. As equações de fluxo e transporte governantes são resolvidas numericamente usando esquemas de elementos finitos lineares do tipo Galerkin. A integração no tempo é alcançada usando um esquema implícito de diferenças finitas para condições saturadas e insaturadas

Os dados de entrada para a simulação no Hydrus1D estão organizados alguns blocos, aqui cada bloco de parâmetros foi chamado de módulo e definido em: *geral*, *solo*, *planta*, *atmosfera* e o *sistema solo*, sujeitos as condições iniciais e de fronteiras (Figura 2).

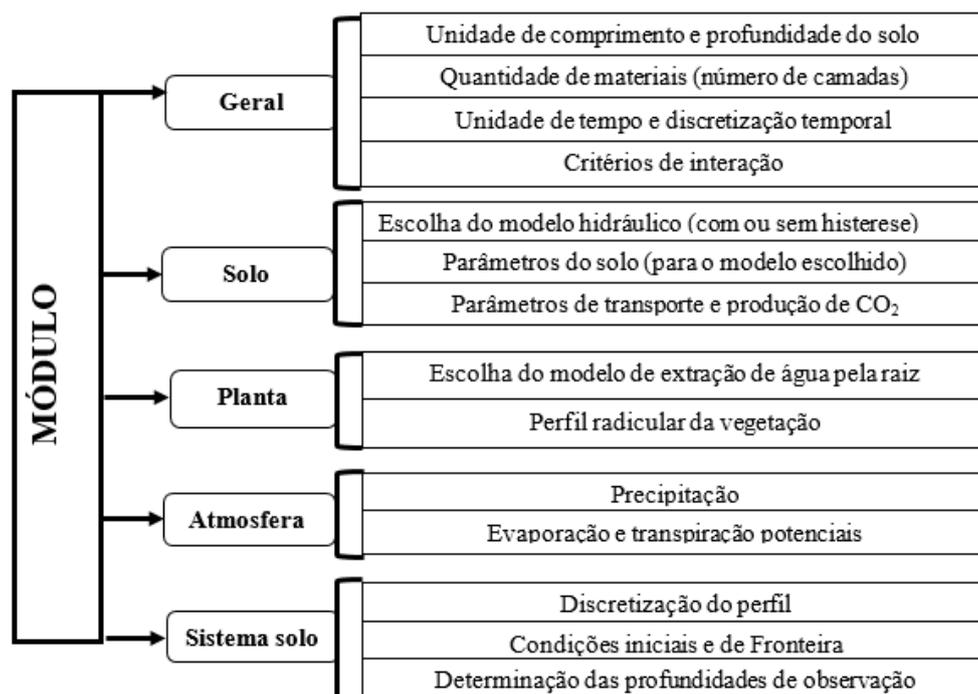


Figura 2 – Dados de entrada para esta simulação com Hydrus1D.

No módulo “geral” é definida a unidade de medida de comprimento (m, cm ou mm), profundidade do solo e o número de camadas do solo. Em seguida é definida a unidade de medida do tempo (segundo, minuto, hora, dias ou ano), a discretização temporal (intervalo de simulação, tempo inicial, tempo máximo e tempo mínimo), e os critérios de interações necessários para a convergência dos cálculos. No módulo “solo” é feita a escolha do modelo hidráulico (com ou sem histerese), entrando com os parâmetros do solo para o modelo hidráulico escolhido, os dados de transporte e produção de CO<sub>2</sub> além das condições de fronteira superior e inferior. No módulo “planta” determina-se o modelo de extração de água pelo sistema radicular e os parâmetros da planta.

Os dados de entrada necessários para o módulo “atmosfera” são a precipitação, a evaporação do solo e a transpiração da planta na unidade de comprimento escolhida. No módulo “sistema solo” é feita a discretização do perfil do solo e dados do perfil radicular da cultura, as condições iniciais (perfil de umidade volumétrica ou perfil de potencial matricial) e as profundidades de observação.

O Hydrus1D ainda implementa uma técnica de estimativa de parâmetro do tipo Marquardt-Levenberg para estimativa inversa de parâmetros selecionados de transporte, hidráulicos e de solutos. O procedimento permite que vários parâmetros desconhecidos sejam estimados a partir de diversas concentrações ou fluxos instantâneos ou cumulativos. Para estas simulações com o programa Hydrus1D foi necessário diversos dados que compõem a entrada do modelo, como os parâmetros hidráulicos do solo, além de dados climáticos e da vegetação.

Os parâmetros  $n$ ,  $m$  e  $hg$  da curva de retenção de água no solo, o parâmetro  $\eta$  e a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) foram determinados pela metodologia Beerkan (SOUZA et al., 2008). As umidades volumétricas do solo foram determinadas pela metodologia da Embrapa, na qual a amostra de solo coletada foi posta a secar ao ar livre, e em seguida foi pesada em balança de precisão, sendo levada a estufa a 105°C por 24 horas e pesada novamente. Os parâmetros hidráulicos do solo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios dos parâmetros dos parâmetros hidráulicos do solo.

$\Delta z$ (cm)	$n$ (-)	$\eta$ (-)	$\theta_r$ (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	$\theta_s$ (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	$K_s$ (mm.d <sup>-1</sup> )	$hg$ (mm)
0-20	2,288	10,303	0,018	0,375	7.034,7	-18,565
20-40	2,275	10,747	0,032	0,344	2.151,6	-45,068
40-60	2,433	9,667	0,020	0,305	552,7	-92,576

Fonte: ALVES (2015)

O modelo hidráulico usado nesta simulação foi de simples porosidade de Van Genuchten – Mualem (1980) e as condições de contorno foram Atmospheric BC with surface layer, tal condição superior permite que a inclusão de dados de precipitação evapotranspiração e Variable flux, esta condição inferior permite que o fluxo de água possa variar ao longo da simulação.

### 3 – RESULTADOS

As simulações da respiração do solo com o Hydrus1D apresentou resultados relativamente interessantes quando comparado com as medidas de campo, as curvas simuladas se aproximaram da curva das medições de campo. As medidas de campo foram realizadas por Ferreira (2015) por meio de um *Infra-Red gas Analyzer* (IRGA).

O aparelho IRGA (Licor LI-6400-09) possui uma câmara de retenção de gás de 991 cm<sup>3</sup>, cobrindo uma área de superfície do solo de 71,6 cm<sup>2</sup>, um irradiador infravermelho e uma câmara de medição, também descrita como caminho óptico e filtro mais um detector (FERREIRA, 2015). As medidas deste fluxo de CO<sub>2</sub> foram feitas mensalmente e a média das medidas realizadas por mes e simuladas pelo Hydrus1D podem ser vistas na Figura 3.

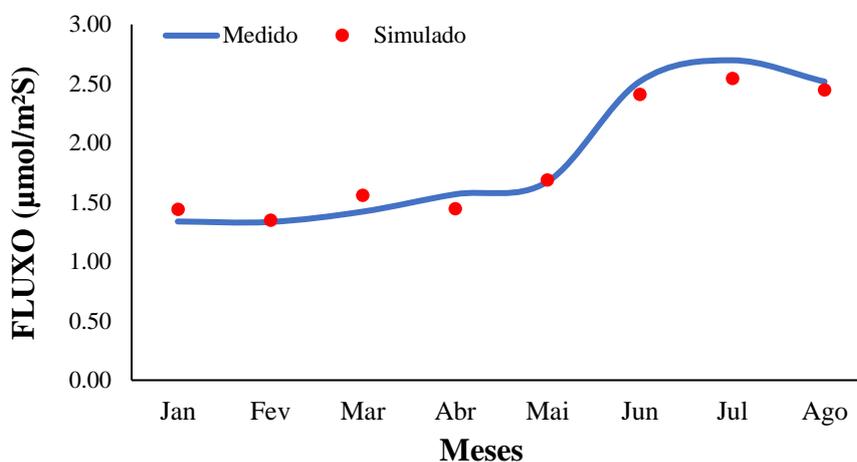


Figura 3 – Dados medidos e simulados pelo Hydrus1D do fluxo de CO<sub>2</sub> no solo.

Pode-se observar que o modelo simulou muito bem o comportamento da variação sazonal das medidas de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo de estudo, porem com valores que estão subestimados em um ponto e superestimados em outro ponto de medida, mesmo com a correlação entre os valores medidos e os simulados apresentando valor R<sup>2</sup> de 0,84. Uma possibilidade é aumentar a quantidade de medidas de campo para que tenhamos uma convergencias dos dados numéricos simulados pelo modelo, outra hipótese é perceber que, segundo Simunek et al.; (1998) a variável optimal Carbon Dioxide

Production equivale a produção de CO<sub>2</sub> ótima em um solo com 20°C de temperatura e umidade do solo e concentração de soluto sobre condições ótimas.

Devido à ausência de alguns dados, sendo necessário usar a ferramenta de *Neural Network Predictions* do próprio programa Hydrus1D, foi estabelecida o valor do fluxo de 16,40  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{S}$  para as atividades dos microrganismos e o fluxo noturno para a respiração das raízes de 3,84  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{S}$ .

Os ajustes que os dados do local de estudo recebem durante a construção do modelo do HYDRUS-1D, como os parâmetros do solo, raízes e produção de CO<sub>2</sub>, não representam com total fidelidade a situação de campo. Além disso, não há diferença significativa nas simulações realizadas entre o fluxo diurnos e noturnos. Sendo simulação tal simulação equivalente ao valor do fluxo em um dia, ou 12 horas. Contudo, a software representa bem as leis que governa o fenômeno da respiração do solo, com aumento do fluxo nos meses mais úmidos devido ao aumento das atividades dos microrganismos e raízes das plantas, como pode ser bercebido na Figura 4.

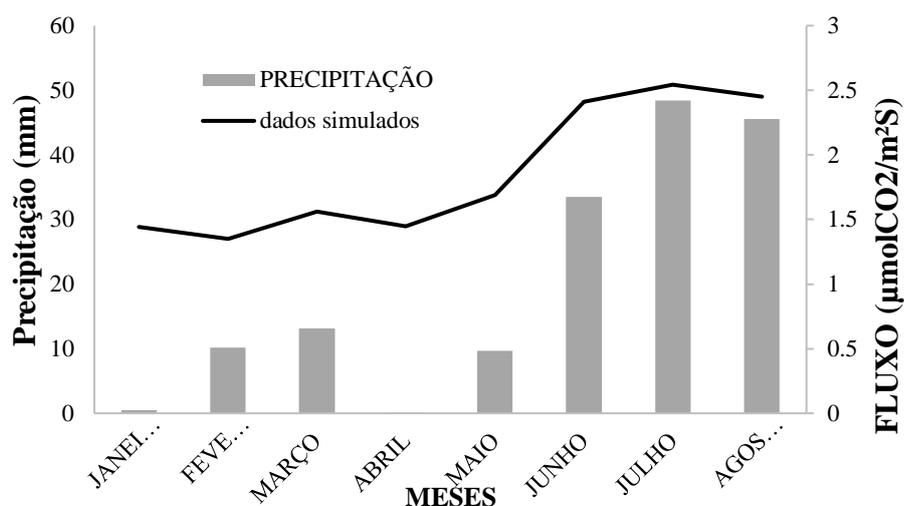


Figura 4 – Dados simulados pelo Hydrus1D do fluxo de CO<sub>2</sub> no solo em função da precipitação local.

Pode-se observar que quanto maior o armazenamento de água no solo, maior será a atividade microbiana e conseqüentemente haverá um aumento da emissão de CO<sub>2</sub> pelo solo.

#### 4 – CONCLUSÕES

O meio ambiente possui mecanismos naturais que demonstram os impactos das atividades antropológicas em frente as mudanças climáticas. A respiração do solo é uma importante etapa do

ciclo do carbono bastante sensível às alterações impostas ao meio. Pode-se concluir-se que o Hydrus1D é uma boa ferramenta para simular os diversos fenômenos que ocorrem no solo, que respondeu bem as variáveis do modelo e que pode ser uma ferramenta muito importante para investigação de cenários futuros, podendo assim contribuir para uma melhor compreensão dos fenômenos de respiração do solo e combate às atividades que podem desequilibrar o ciclo de carbono na ambiente.

## REFERÊNCIAS

ALVES, E. M. (2009). *Aplicação do programa Hydrus1D em solo cultivado com feijão caupi*. Dissertação. Departamento de Energia Nuclear, DEN – UFPE, Recife-PE.

ALVES, E. M. (2015). *Fluxo de energia, vapor d'água e CO<sub>2</sub> entre a vegetação e atmosfera no agreste meridional de Pernambuco*. Tese. Departamento de Energia Nuclear, DEN – UFPE, Recife-PE.

APAC – Agência pernambucana de águas e clima. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br>>. Acesso em: 05 mar. 2019

CIRILO, J. A. (2008). *Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido brasileiro*. Estudos Avançados (USP. Impresso), v.63, p. 61-82.

FERREIRA, C. R. P. C. (2015). *Respiração do solo em áreas de caatinga e de pastagem no agreste de Pernambuco*. Dissertação. Departamento de Energia Nuclear, DEN – UFPE, Recife-PE

GENUCHTEN, M. Th. Van. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, v. 44, n. 5, p. 892-898.

MARTINS, C. M.; GALINDO, I. C. L.; SOUZA, E. R.; POROCA, H. A. (2012). *Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco*. R. Bras. Ci. Solo, 34:1883-1890.

SIMUNEK, J., M. SEJNA, M. T. VAN GENUCHTEN. (1998). *The Hydrus1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*, user's manual, versão 3.0, Department of environmental sciences university of California riverside, U.S. Salinity Lab., Agric. Res, California.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. (2008). *Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Capina Grande, v.12, n.2, p.128–135.