

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA

SPATIAL MODELING FOR PRIORITIZING AND VALUING PAYMENTS FOR ECOSYSTEM SERVICES IN AN ENVIRONMENTAL PROTECTION AREA: A CASE STUDY USING AN ADAPTED ACWY MODEL AND CLIMATIC WATER PROVISION POTENTIAL

Igor Lima de Oliveira¹, Artur Felizardo Laurênio de Melo¹, Fernando Cartaxo Rolim Neto¹, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira¹, Ralini Ferreira de Melo¹, Marcus Metri Correa¹, Ioneide Alves de Souza¹, Francinete Francis Lacerda², Ricardo Andrade Wanderley¹, Anildo Monteiro Caldas¹

e2515458

<https://doi.org/10.33947/geociencias.v25i1.5458>

PUBLICADO: 8/2026

RESUMO

O presente trabalho aborda a importância do desenvolvimento sustentável aliado à conservação dos recursos naturais na Área de Proteção Ambiental (APA) Aldeia–Beberibe, em Pernambuco, destacando o papel do Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) como instrumento de incentivo à preservação ambiental. A degradação dos recursos hídricos e pedológicos, causada principalmente pelas ações antrópicas e pela ocupação inadequada do solo, compromete os serviços ecossistêmicos e a segurança hídrica da região. Nesse contexto, o estudo ressalta a necessidade de políticas públicas e ferramentas de gestão ambiental capazes de conciliar conservação ambiental e desenvolvimento socioeconômico sustentável. O objetivo da pesquisa foi determinar a vulnerabilidade ambiental da APA Aldeia–Beberibe, identificando áreas prioritárias para implementação de programas de PSA e estimando os valores monetários destinados às áreas elegíveis. O estudo buscou integrar variáveis ambientais e socioeconômicas para subsidiar estratégias de gestão territorial voltadas à proteção dos recursos hídricos e do solo, além de promover sugestão de práticas agrícolas sustentáveis. A análise ambiental integrou variáveis como uso e ocupação do solo, declividade, tipos de solo e geologia, as quais foram ponderadas por meio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), permitindo a elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental. Aplicando-se o modelo adaptado do *Agriculture for Clean Water Yield* (ACWY), que considerou parâmetros econômicos da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) para calcular os valores de compensação financeira do PSA.

PALAVRAS-CHAVE: Geoprocessamento. Segurança hídrica. Análise multicritério.

ABSTRACT

This study addresses the importance of sustainable development associated with the conservation of natural resources within the Aldeia–Beberibe Environmental Protection Area (EPA), in Pernambuco, Brazil, highlighting the role of Payment for Environmental Services (PES) as a mechanism to encourage environmental preservation. The degradation of water and soil resources, mainly caused by anthropogenic activities and inadequate land occupation, compromises ecosystem services and the region's water security. In this context, the study emphasizes the need for public policies and environmental management tools capable of reconciling environmental conservation with sustainable socioeconomic development. The objective of this research was to determine the environmental vulnerability of the Aldeia–Beberibe EPA by identifying priority areas for the implementation of PES programs and estimating monetary compensation values for eligible areas. The study sought to integrate environmental and socioeconomic variables to support territorial management strategies aimed at protecting water and soil resources, while also promoting sustainable agricultural practices. The environmental analysis integrated variables such as land use and land cover, slope, soil classes, and geology, which were weighted using the Analytic Hierarchy Process (AHP), enabling the development of an environmental vulnerability map. Applying the adapted Agriculture for Clean

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife.
igor.limaoliveira@ufrpe.br - <https://orcid.org/0009-0005-4498-0164>, artur.laurenio@ufrpe.br - <https://orcid.org/0009-0005-2641-2868>, fernandocartaxo@yahoo.com.br - <https://orcid.org/0000-0002-6411-2058>, alexandre.mroliveira@ufrpe.br - <https://orcid.org/0009-0004-1040-142X>, fmraini@yahoo.com.br - <https://orcid.org/0000-0002-6884-9057>, marcus.metri@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-9506-8969>, ioneide_clima@yahoo.com.br - <https://orcid.org/0000-0001-5144-8444>, ricardo.wanderley@ufrpe.br - <https://orcid.org/0000-0003-1043-1544>, monteiro.dtr.ufrpe@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-1095-5938>

² Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), Recife-PE. francislacerda2012@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-7130-0778>

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Water Yield (ACWY) model, considering economic parameters related to sugarcane cultivation (Saccharum officinarum) to estimate the financial compensation values for PES programs.

KEYWORDS: Geoprocessing. Water security. Multi-criteria analysis.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável tem sido um dos temas centrais para garantir o bem-estar da humanidade, pois equilibra o crescimento econômico, a proteção ambiental e a equidade social (Mota *et al.*, 2023). No entanto, os desafios para assegurar que as ações antrópicas sejam conduzidas de maneira sustentável para as gerações futuras são complexos e exigem políticas eficazes e gestão eficiente dos recursos naturais (Brasil, 2021).

Nos sistemas de produção agropecuários, a qualidade do solo e da água são elementos fundamentais para garantir serviços ecossistêmicos sustentáveis, levando em consideração as dimensões ecológicas, sociais e econômicas. Assim, entender as ações antrópicas e a gestão ambiental é essencial, uma vez que, em muitas atividades, esses fatores podem se opor (Lobo de Paiva *et al.*, 2022). A degradação dos recursos naturais é um reflexo da falta de medidas efetivas ou incentivos para implementação de estratégias sustentáveis impactando diretamente a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (Vieira *et al.*, 2020).

O estudo dos atributos ambientais desempenha um papel crucial ao fornecer subsídios para uma gestão ambiental e socioeconômica mais eficiente, colaborando para o desenvolvimento das nações (Caldas; Pissarra, 2023). Para garantir a equidade e a sustentabilidade das comunidades, a elaboração de propostas metodológicas, incluindo contratos comunitários, é essencial para o sucesso de programas de conservação ambiental (Lima; Marques, 2023).

O mecanismo de incentivo, como o Pagamento por Serviço Ambiental (PSA), desempenha um papel fundamental na preservação dos recursos naturais. A implementação adequada desses esquemas pode atender aos objetivos de conservação, promovendo a sustentabilidade e a valorização dos recursos naturais (Dalla Pria; Diederichsen; Klemz, 2013). É importante enfatizar que o PSA deve ser visto como um incentivo para a conservação e não como um imposto adicional para os produtores rurais (Frey *et al.*, 2021).

A água é um dos recursos naturais mais valiosos para a natureza e para o desenvolvimento social e econômico (Melo *et al.*, 2023). Quando os sistemas de produção não são valorizados, o resultado pode ser um ambiente de má qualidade da água, comprometendo a segurança hídrica (Pissarra *et al.*, 2022). O não monitoramento da qualidade da água é um dos principais desafios enfrentados pela gestão ambiental (Silveira; Lopes, 2022).

A implantação de programas de PSA em Áreas de Proteção pode contribuir significativamente para a conservação desses recursos essenciais (Haavisto; Santos; Perrels, 2019).

O uso de tecnologias como Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento tem se mostrado uma ferramenta essencial para a tomada de decisão em relação à gestão dos recursos naturais (Parras *et al.*, 2024).

As políticas públicas desempenham um papel crucial na efetivação do PSA, sendo necessárias

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

medidas governamentais para incentivar a adoção de práticas sustentáveis (Coelho *et al.*, 2021).

A implementação de medidas que equilibrem a exploração dos recursos ambientais com práticas agropecuárias sustentáveis é essencial para garantir a disponibilidade de água limpa e a sustentabilidade ambiental (Costa, J.; Costa, V., 2022).

As áreas que apresentam simultaneamente maior vulnerabilidade ambiental e maior potencial climático de provisão hídrica tendem a receber os maiores valores de compensação financeira por Pagamento por Serviços Ambientais, tornando o modelo uma ferramenta eficiente para direcionar investimentos em conservação e fortalecer a segurança hídrica da APA Aldeia-Beberibe.

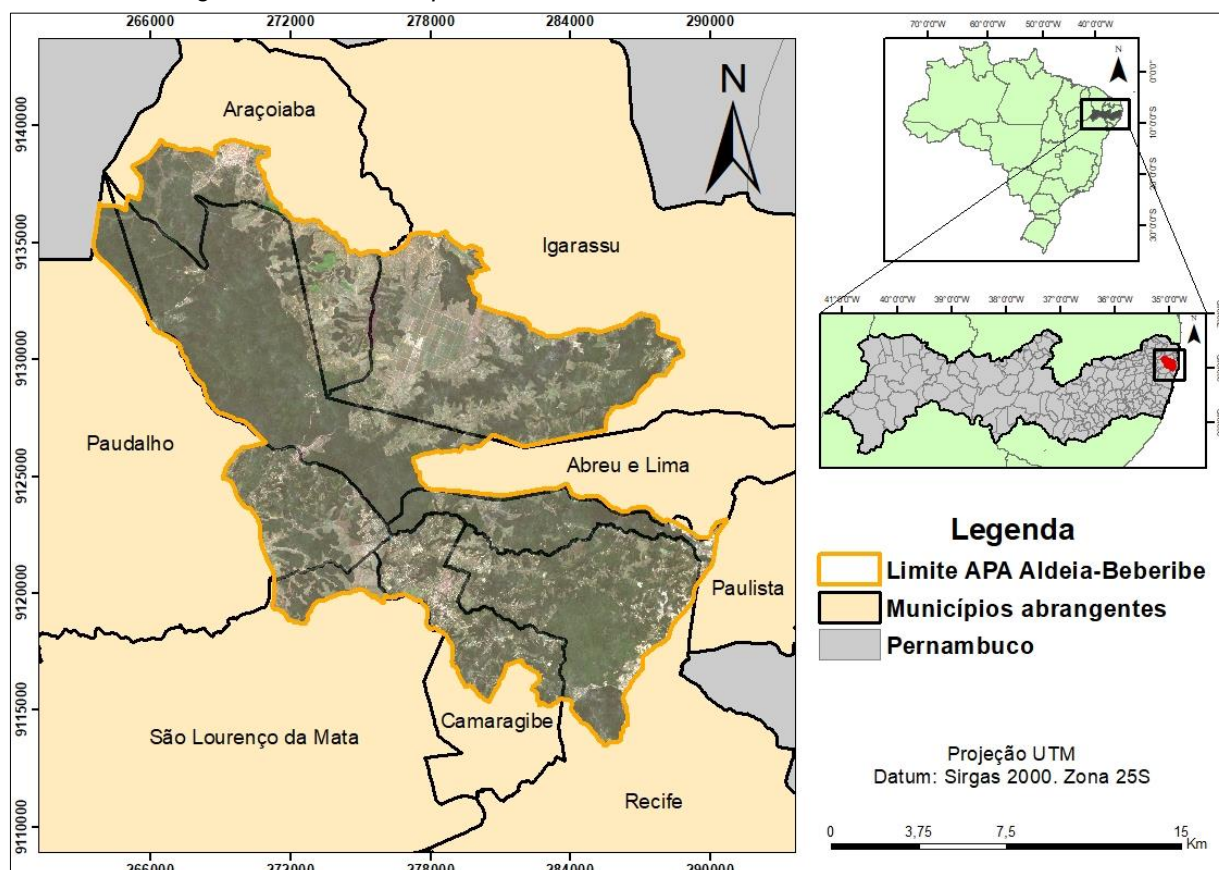
Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo determinar a vulnerabilidade ambiental e identificar áreas potenciais para enquadramento em esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), incluindo a estimativa de valores monetários para as áreas elegíveis na APA Aldeia-Beberibe.

MATERIAIS E MÉTODOS

Abrangendo os municípios de Camaragibe, Recife, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Araçoiaba, São Lourenço da Mata e Paudalho, a APA Aldeia-Beberibe (Figura 1) possui uma área de 316,34 km², localizada na Zona da Mata de Pernambuco com coordenadas UTM: 266.414,708 e 9.139.328,532 metros a 285.927,768 e 9.113.862,336 metros, Zona SC, Fuso 25S. Criada pelo Decreto 34.692, em 17 de março de 2010, a unidade engloba uma das regiões prioritárias para a conservação da biodiversidade, tendo como objetivos proteger os recursos hídricos, as espécies raras e ameaçadas de extinção da fauna e a flora da Mata Atlântica, além de promover a melhoria da qualidade de vida da população residente na APA e em seu entorno, visando ao convívio respeitoso e sustentável com a natureza (CPRH, 2021).

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Figura 1: Mapa de localização da APA Aldeia-Beberibe.
Figure 1: Location Map of the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area



Fonte: Os autores 2026. Elaborado a partir de dados do IBGE 2022.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, corresponde aos tipos Af e Am, denominados Tropical Úmido, apresentando variabilidade da temperatura média entre 23,4 °C e 25,8 °C, além de precipitação anual variando de 1200 mm a 1800 mm (Medeiros *et al.*, 2018; Medeiros *et al.*, 2021).

Para o geoprocessamento e a aquisição de imagens, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da missão ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 metros, disponibilizado gratuitamente nos portais da Alaska Satellite Facility (ASF) e do Copernicus Open Access Hub. A modelagem digital foi realizada no software ArcGIS da ESRI.

Os dados de uso e ocupação do solo, foram obtidos de mosaico de imagens da coleção 09 da plataforma MapBiomas. Cada *pixel* foi classificado conforme seu uso do solo, por meio de algoritmos capazes de identificar padrões espectrais. As classes foram representadas utilizando o padrão RGB, coleção MapBiomas.

As classes de solo foram adquiridas a partir de dados disponibilizados pela plataforma da Embrapa Solos (SiBCS, 2025). Após a vetorização das informações, foi possível identificar os diferentes tipos de solo presentes na área de estudo.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

A partir do MDE foi possível a análise da declividade, calculada por meio da ferramenta “*Slope*”, no ArcGIS. A declividade foi utilizada para classificar o relevo conforme as categorias da EMBRAPA (2025), que variam de suave (0–3%) a escarpado (>75%).

Os dados para a elaboração do mapa geológico foram obtidos no repositório digital do Serviço Geológico do Brasil (Santos; Lima, 2023), que reúne mapas, relatórios e descrições litológicas essenciais para a análise geológica da área de estudo. Os dados foram vetorizados, possibilitando a conversão das feições geológicas para formato digital vetorial e permitindo a identificação das diferentes formações geológicas presentes na APA Aldeia-Beberibe.

A vulnerabilidade ambiental foi calculada a partir da análise integrada das variáveis ambientais: uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade e geologia, que foram reclassificados em classes, para as quais foram atribuídos valores que variaram em uma escala de zero a dez, proposto por Saaty (1977), referentes ao grau de susceptibilidade, conforme (Tabela 1).

Tabela 1 - Classes de Susceptibilidade.
Table 1 – Susceptibility Classes

Susceptibilidade	Grau
Menos vulnerável	0
Mais vulnerável	10

Fonte: Saaty (1977).

Apartir dos valores do grau de susceptibilidade, foi determinado os pesos estatísticos do modelo para cada fator ambiental envolvido. Para a representação do risco de inundação, os fatores serão hierarquizados utilizando o método de AHP proposto por Saaty (2008), que consiste na categorização do problema em níveis hierárquicos lineares de importância em relação a cada fator ambientais pré-definidos (Tabela 2).

Tabela 2 - Escala de comparadores com os respectivos pesos de importância
Table 2 – Comparator Scale with Their Respective Importance Weights

Valores	Importância mútua
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente menos importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

Fonte: Saaty (2008).

O Em seguida, o grau de cada fator foi definido a partir da importância de cada um dentro do processo de vulnerabilidade, sendo estas importâncias obtidas em levantamentos bibliográficos e em debates com uma equipe multidisciplinar.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Assim, definiu-se a seguinte ordem de influência dos fatores ambientais (Tabela 3).

Tabela 3 - Fatores, grau de susceptibilidade às classes e pesos para determinar a vulnerabilidade
Table 3 – Factors, susceptibility levels of the classes, and weights used to determine vulnerability

Fator: Geologia		
Classes	Grau de susceptibilidade	Peso do fator
Barreiras	8	1
Depósitos aluvionares	9	
Depósitos flúvio-marinhos	10	
Itamaracá	7	
Itaporanga	6	
Plúton São José	5	
Salgadinho	6	
Surubim-Carolina	7	
Surubim-Carolina Quartzito	8	
Fator: Classes de Solos		
Classes	Grau de susceptibilidade	Peso do fator
Argissolo	7	3
Espodossolo	6	
Gleissolo	9	
Latossolo	5	
Neossolo	8	
Fator: Declividade		
Classes	Grau de susceptibilidade	Peso do fator
Plano	1	5
Suave ondulado	3	
Ondulado	5	
Forte ondulado	7	
Montanhoso	8	
Escarpado	9	
Fator: Uso e Ocupação		
Classes	Grau de susceptibilidade	Peso do fator
Mata	7	7
Pastagem	5	
Agricultura	3	
Área urbana	0	
Rio e lagos	0	

Fonte: Os autores, 2026.

O fator geologia foi classificado de acordo com a suscetibilidade das unidades geológicas presentes na área de estudo. Os depósitos flúvio-marinhos receberam o maior grau de suscetibilidade grau 10, por serem formações sedimentares recentes, pouco consolidadas e frequentemente associadas a áreas de baixa altitude e elevada dinâmica hídrica. Os depósitos aluvionares foram classificados com grau 9 devido à elevada instabilidade e alta propensão ao acúmulo de água e à erosão. As unidades Barreiras e Surubim–Carolina Quartzito receberam grau 8, enquanto a unidade Surubim–Carolina foi classificada com grau 7. As formações Itamaracá, Itaporanga e Salgadinho apresentaram suscetibilidades intermediárias, com graus variando entre 6 e 7. Já o Plúton São José recebeu o menor grau de suscetibilidade grau 5, em virtude de sua maior resistência litológica e menor propensão aos processos de instabilidade.

Em relação às classes de solos, o Gleissolo apresentou a maior suscetibilidade grau 9, devido às suas características hidromórficas e à drenagem deficiente, favorecendo o acúmulo de água. O Neossolo

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

recebeu grau 8 por ser um solo geralmente raso, pouco desenvolvido e mais suscetível aos processos erosivos. O Argissolo foi classificado com grau 7 em razão da elevada susceptibilidade à erosão hídrica, principalmente em áreas com relevo movimentado. O Espodossolo recebeu grau 6, enquanto o Latossolo apresentou a menor susceptibilidade grau 5, em função de sua elevada profundidade, boa estrutura e maior estabilidade física.

Quanto ao fator declividade, as áreas planas receberam o menor grau de suscetibilidade grau 1, em decorrência da reduzida influência da inclinação do terreno nos processos erosivos. À medida que a declividade aumenta, a suscetibilidade também se eleva, sendo classificadas como suave ondulado grau 3, ondulado grau 5, forte ondulado grau 7, montanhoso grau 8 e escarpado grau 9, refletindo o aumento da velocidade do escoamento superficial e do potencial de erosão e instabilidade do terreno.

No fator uso e ocupação do solo, as áreas de mata receberam o maior grau de suscetibilidade grau 7, conforme os critérios adotados na metodologia. As áreas de pastagem foram classificadas com grau 5, por apresentarem suscetibilidade intermediária, enquanto as áreas de agricultura receberam grau 3. As áreas urbanas e os corpos hídricos (rios e lagos) receberam grau 0, por não serem considerados suscetíveis segundo a classificação utilizada na composição do índice de vulnerabilidade.

Segundo a escala de comparadores Tabela 2, foram considerados os fatores de maior relevância, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4. Quando um fator é comparado consigo mesmo, o resultado é necessariamente 1, já que possui a mesma importância.

Tabela 4 - Matriz de comparação pareada.
Table 4 - Pairwise Comparison Matrix

Fatores	Geologia	Classe de Solo	Declividade	Uso e Ocupação
Geologia	1	0,33	0,20	0,14
Tipo de Solo	3	1	0,33	0,20
Declividade	5	3	1	0,33
Uso e Ocupação	7	5	3	1
Soma	16	9,33	4,53	1,68

A partir dos valores da Tabela 4, foram calculados os pesos estatísticos de cada fator. Para isso, os fatores foram divididos pela soma total da sua respectiva coluna, e, em seguida, realizou-se a média entre as colunas, obtendo-se assim o peso final de cada fator (Tabela 5).

Tabela 5 - Determinação dos pesos estatísticos para cada variável.
Table 5 - Determination of Statistical Weights for Each Variable

Fatores	Geologia	Tipo de Solo	Declividade	Uso e Ocupação	Peso
Geologia	0,0625	0,0357	0,0441	0,0852	0,0569
Tipo de Solo	0,1875	0,1071	0,0735	0,1193	0,1219
Declividade	0,3125	0,3214	0,2206	0,1989	0,2633
Uso e Ocupação	0,4375	0,5357	0,6618	0,5966	0,5579
Soma	1	1	1	1	1

Através da Equação 1: $RC = IC/IR$, em que, RC é a razão de consistência, IR é o índice aleatório e IC é o índice de consistência, foi validado os pesos atribuídos para o mapa de vulnerabilidade, obtendo-se

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

em um coeficiente de RC satisfatório de 0,0439, na qual o valor foi inferior ao limite de 0,1 para que o modelo seja aceitável.

Na Equação 1, o RC foi obtido a partir do IC (dado pela Equação 2) e do IR (índice aleatório, conforme valores de referência da Tabela 6).

Tabela 6 - Índice Aleatório (valores de IR para matrizes quadradas de ordem n)
Table 6 - Random Consistency Index (RI Values for Square Matrices of Order n)

n	2	3	4	5	6	7
IR	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo n a dimensão da matriz (número de variáveis) e λ_{max} o autovalor, obtido pela (Equação 3).

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Aw]_i}{w_i} \quad (\text{Equação 3})$$

Na Equação 3, $[Aw]_i$ representa a matriz gerada pela multiplicação entre a matriz de comparação pareada (Tabela 4) e os pesos estatísticos (Tabela 5).

A partir dos valores obtidos de $[Aw]$ (Tabela 7), obteve-se $\lambda_{max} = 4,1185$, utilizado para calcular o IC, resultando em 0,03949.

Tabela 7 - Valores de Aw
Table 7 - Aw Values

Fatores	Geologia	Classe de Solo	Declividade	Uso e Ocupação	Peso estatísticos	Valores de Aw
Geologia	0,0625	0,0357	0,0441	0,0852	0,0569	0,2299
Tipo de Solo	0,1875	0,1071	0,0735	0,1193	0,1219	0,4919
Declividade	0,3125	0,3214	0,2206	0,1989	X 0,2633	= 1,0994
Uso e Ocupação	0,4375	0,5357	0,6618	0,5966	0,5579	2,3555

Fonte: Os autores, 2026.

Validado os pesos estatísticos de cada fator ambiental P1, P2, P3 e P4 para a elaboração do mapa de vulnerabilidade (Vu) da APA Aldeia-Beberibe, utilizou-se a Equação 4.

$$Vu = (\text{Geologia} * 0,0569) + (\text{Classe de Solo} * 0,1219) + (\text{Declividade} * 0,2633) + (\text{Uso do Solo} * 0,5579)$$

(Equação 4)

A estimativa dos valores de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) na APA Aldeia-Beberibe foi realizada por meio da adaptação do modelo *Agriculture for Clean Water Yield* (ACWY) preconizado por Pissarra, Sanches e Pacheco (2021), que integra a produção hídrica, o custo de oportunidade da terra e a vulnerabilidade ambiental.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Por tanto, substituindo a variável de rendimento hídrico por dados de precipitação média anual. Ou seja, áreas com maiores índices pluviométricos possuem maior potencial de contribuição para a manutenção dos recursos hídricos.

Dessa forma, o PSA passa a refletir simultaneamente: o potencial de contribuição hídrica da área; o custo de oportunidade associado à cultura predominante e a prioridade ambiental definida pelas classes de vulnerabilidade.

A APA foi compartimentada em unidades hidrológicas utilizando o modelo *SWAT* integrado ao ArcGIS, permitindo a delimitação das sub-bacias hidrográficas e a caracterização espacial da dinâmica hídrica da área de estudo.

Com base nesses parâmetros, aplicou-se o modelo ACWY de Pissarra, Sanches e Pacheco (2021), adaptado para a APA Aldeia-Beberibe, conforme a Equação 5:

$$ACWY = P * (Pcp * Fator X) * Vu \quad (\text{Equação 5})$$

Onde, originalmente, ACWY representa o valor do PSA; Wy o potencial de produção hídrica para uma bacia hidrográfica apoiado ao $Q_{7,10}$ que representa a menor vazão média de 7 dias consecutivos, com um tempo de retorno de 10 anos; O Pcp corresponde ao componente econômico definido com base na cultura predominante da região, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) na qual, foi adotada a receita líquida de 1.895,00 US\$/ha/ano, conforme o IBGE (2024). O Fator X é o fator de compensação (0,5), onde o modelo assume que a conversão para sistemas conservacionistas reduz parcialmente a rentabilidade da propriedade rural. Para compensar essa perda, é aplicado um coeficiente de compensação, ou seja, 50% da renda líquida da atividade agrícola é utilizada como valor-base para o pagamento ao produtor rural. O (Vu) é o índice de vulnerabilidade ambiental da APA utilizado para incorporar a prioridade ambiental das áreas. Onde foram classificadas em baixa vulnerabilidade, vulnerável, alta vulnerabilidade e extrema vulnerabilidade, recebendo reajustes de 0%, 10%, 20% e 30%, respectivamente, sobre o valor-base de compensação. Dessa forma, áreas classificadas em níveis mais elevados de vulnerabilidade ambiental apresentam maior potencial de uso conservacionista, resultando em reajustes progressivos nos valores estimados de PSA.

O modelo ACWY adaptado utiliza o índice pluviométrico (P), obtido a partir de séries históricas de precipitação disponibilizadas pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2024), considerando a precipitação média anual de um período de 30 anos para os municípios inseridos na APA Aldeia-Beberibe. Como a área de estudo não compreende uma bacia hidrográfica, o modelo ACWY foi adaptado, utilizando-se o índice pluviométrico (P) em substituição do Wy. Tal substituição, também, permite que o referido modelo possa ser utilizado para áreas que não possuem observação de dados e cálculos para o $Q_{7,10}$.

Esta adaptação faz com que o indicador deixa de ser interpretado como potencial de produção hídrica e passe a representar o Potencial climático de provisão hídrica.

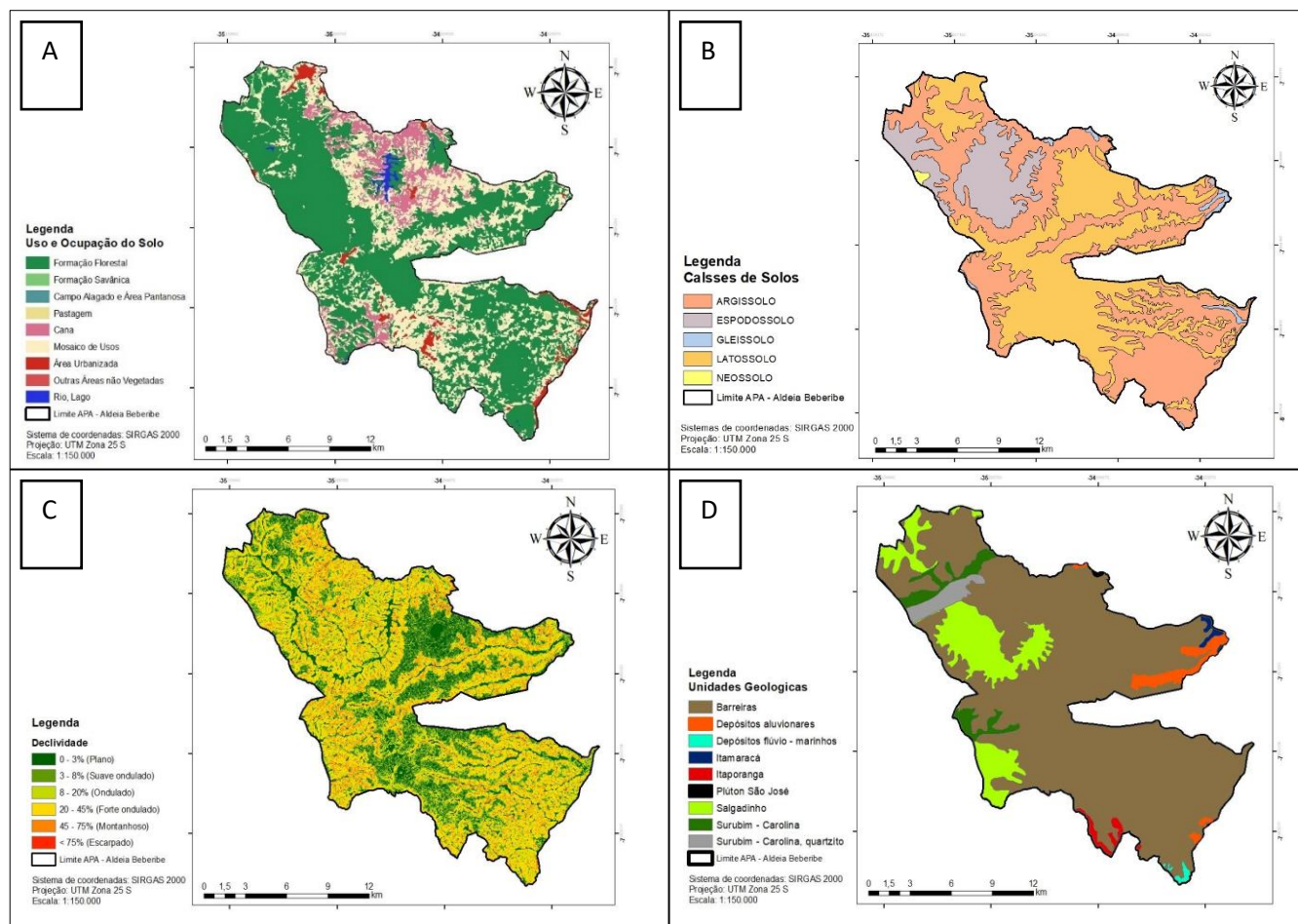
MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Melo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra os fatores ambientais que influenciam diretamente na vulnerabilidade ambiental da APA- Aldeia-Beberibe.

Figura 2: A - Mapa do uso e ocupação do solo, B - Mapa de classes de solos, C - Mapa de declividade, D - Mapa da geologia

Figure 2: A – Land Use and Land Cover Map; B – Soil Classes Map; C – Slope Map; D – Geology Map



Fonte: Os autores, 2026.

A análise do uso e ocupação do solo (Figura 2A) é de fundamental importância para estruturação para fundamentação do modelo ACWY adaptado, que leva em consideração a cultura mais ocorrente na área de estudo. A Tabela 8 apresenta os resultados do cálculo das áreas de uso e ocupação, mostrando a quantificação da distribuição espacial na área de estudo.

A predominância da formação florestal e formação savânica, respectivamente cobrem aproximadamente 58,49% e 0,94% da área total, evidenciando uma grande extensão de vegetação natural preservada nas áreas de formação florestal. Em contrapartida, o mosaico de usos ocupa 29,20% do território, indicando uma significativa interferência antrópica. A cana-de açúcar (*Saccharum officinarum*) representa 7,78% da área, reforçando a relevância da agricultura no local, sendo a cultura mais ocorrente

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

As áreas urbanizadas abrangem apenas 2,42%, sugerindo um processo de urbanização controlado. Pastagem e áreas não vegetadas possuem proporções menores, com 0,34% e 0,08%, respectivamente. Pequenas extensões de campo alagado (0,03%) e corpos d'água - Rio, Lago - (0,69%) demonstram a presença de ecossistemas específicos.

A vegetação nativa, aparece concentrada nas áreas de relevo mais acidentado ou próximo a corpos hídricos, o que condiz com sua função de proteção ambiental, enquanto as áreas agrícolas ocupam as regiões mais planas e acessíveis.

Tabela 8 – Valores das áreas de uso e ocupação do solo da APA Aldeia-Beberibe.
Table 8 – Area Values of Land Use and Land Cover Classes in the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area

Uso e Ocupação do Solo	Área (km ²)	Área (%)
Formação Florestal	185,02	58,49
Formação Savânica	2,97	0,94
Campo Alagado e área pantanosa	0,09	0,03
Pastagem	1,08	0,34
Cana-de-açúcar (<i>Saccharum Officinarum</i>)	24,62	7,78
Mosaico de usos	90,5	29,20
Áreas urbanizadas	7,64	2,42
Áreas não vegetadas	0,25	0,08
Rio, lago	2,17	0,69
Total	316,34	100

Fonte: Os autores, 20126.

A ocorrência de conflitos de uso, por exemplo em Áreas de Preservação Permanente (APPs), como margens de rios, topos de morro e nascentes e encostas, possibilita verificar se as APPs estão devidamente cobertas por vegetação, como determina o Novo Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012) ou se foram ocupadas por usos irregulares, como agricultura, pastagem ou construções. Por exemplo, se há uma porcentagem elevada de uso agrícola, e o mapa de conflito de uso e ocupação do solo indicar que essas áreas se sobrepõem a faixas de APPs, isso evidencia um descumprimento à legislação, impactando diretamente sobre os serviços ecossistêmicos dessas áreas, como a proteção da água e do solo (Rodrigues, 2013).

Carvalho, Silva e Salvio (2022) analisaram a vulnerabilidade ambiental em APA do Bioma Mata Atlântica na região sudeste brasileira, destacando o papel da vegetação na manutenção dos serviços ecossistêmicos, demonstrando como a agricultura e a pecuária têm avançado sobre áreas protegidas. Vila Nova (2021) analisou fatores de vulnerabilidade florestal com base nos sistemas socioeconômicos e naturais, associados ao uso e ocupação do solo urbano em APA, mostrando como o crescimento desordenado compromete a integridade ecológica. Por outro lado, Rodrigues (2013) e Rodrigues e Pissarra (2015) relatam que, com as informações do uso e ocupação do solo, é possível a elaboração de um plano

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

para recuperação de área degradadas e ocupadas indevidamente, priorizando as que sofrem maior ação antrópica negativa, recompondo a vegetação nativa em regiões de conflito ambiental.

Os dados de uso e ocupação do solo permitem compreender não apenas a quantidade de cada tipo de uso, mas também seu peso relativo no território, sendo importantes para direcionar ações de manejo, estabelecendo um equilíbrio entre a preservação ambiental, o uso do solo e dos recursos hídricos para fins agropecuários e o crescimento planejado dos centros urbanos (Roque; Pierri, 2019).

O uso do solo influencia diretamente a capacidade de retenção de água, podendo ser convertido em um Serviço Ambiental (SA). O incentivo financeiro ao produtor rural em áreas de gestão deve ser concedido apenas quando forem adotadas práticas de manejo e conservação, por meio de atividades agropecuárias baseadas no uso sustentável do solo (Pissarra, *et al.*, 2022).

O mapa de solo (Figura 2B) apresenta a distribuição das classes de solo na região. Na Tabela 9, encontram-se as áreas e respectivos percentuais dos solos que ocorrem na área, destacando-se a predominância do Argissolo, que cobre 43,84% da área, indica solos altamente intemperizados, típicos de regiões tropicais, que possuem boa drenagem, mas exigem manejo adequado para a agricultura. Em seguida, o Latossolo (42,50%), demonstram a presença de solos desenvolvidos, com boa capacidade agrícola quando bem manejados.

O Espodosolo representa 12,34%, sugerindo áreas com maior acúmulo de matéria orgânica e baixa fertilidade natural. Pequenas proporções de Gleissolo (1,10%) indicam solos hidromórficos, possivelmente associados a áreas alagadas.

O Neossolo apresenta baixa representatividade (0,22%), caracterizando solos muito arenosos, frágeis e suscetíveis à degradação ambiental.

Tabela 9 - Dados da distribuição de classes de solos da APA Aldeia-Beberibe.
Table 9 - Distribution Data of Soil Classes in the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area

Classes de Solos	Área (km ²)	Área (%)
Argissolo	139,06	43,84
Espodosolo	39,05	12,34
Gleissolo	3,49	1,10
Latossolo	134,83	42,50
Neossolo	0,71	0,22
Total	316,34	100

Fonte: Os autores, 2026.

Diversos estudos corroboram a importância da caracterização dos solos para o uso e manejo adequado, visando a conservação ambiental. Conforme, Assouline (2021) o comportamento físico-químico desses solos para aptidão agrícola e retenção de água, as quais são imprescindíveis para a manutenção da vegetação nativa e produção agrícola.

Os Latossolos e Argissolos são frequentemente dominantes devido a sua ampla distribuição geográfica e estabilidade sob condições tropicais (Reynaud Schaefer *et al.*, 2025). Levando em consideração os Latossolos e Argissolos, que ocupam a maior parte da área mapeada na APA Aldeia-Beberibe, estudos realizados por (Spera *et al.*, 2002) na APA Cafuringa - DF demonstram que os Latossolos

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

e Argissolos apresentam as melhores condições para atividades agrícolas, sendo aptos tanto para lavouras quanto para pastagens cultivadas, nos quais os resultados apontaram importantes implicações para o planejamento regional da APA.

As informações sobre classes de solo dispõem de suporte para tomada de decisão consciente para práticas conservacionistas, na qual forneceram subsídios técnicos valiosos para a formulação de políticas públicas que conciliam a produção agrícola sustentável com a conservação ambiental (Braga *et al.*, 2021).

A análise da declividade, representada na Figura 2C e quantificadas na Tabela 10, permite compreender a influência do relevo na área de estudo.

As classes de declividade mais expressivas são as de relevo forte ondulado (33,90%) e ondulado (24,38%), totalizando mais da metade do território da APA. As áreas com relevo suave ondulado (20,07%) e plano (16,26%) indicam porções do território mais favoráveis para a urbanização e atividades agropecuárias. Já as áreas montanhosas e escarpadas somam cerca de 5,37%, limitam o uso do solo e podem estar associadas a ecossistemas preservados.

Tabela 10 - Dados da distribuição da declividade da APA Aldeia-Beberibe.
Table 10 - Slope Distribution Data of the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area

Declividade	Área (km ²)	Área (%)
0 – 3% (Plano)	51,44	16,26
3 – 8% (Suave ondulado)	63,5	20,07
8 – 20% (Ondulado)	77,13	24,38
20 – 45% (Forte ondulado)	107,25	33,90
45 – 75% (Montanhoso)	16,92	5,35
< 75% (Escarpado)	0,1	0,03
Total	316,34	100

Fonte: Os autores, 2026.

As áreas com maior inclinação apresentam limitações significativas ao uso agrícola tradicional, uma vez que a presença de relevo acidentado favorece a ocorrência de processos erosivos e o assoreamento de cursos d'água (Caldas; Pissarra, 2023).

A declividade quando relacionado aos dados de uso e ocupação do solo, possibilita identificar conflitos ambientais como a presença de agricultura em áreas de alta inclinação, o que contraria as diretrizes do Código Florestal Brasileiro. Nesse sentido, a caracterização da declividade é uma ferramenta estratégica para a definição de zonas prioritárias para conservação, recuperação ambiental e implementação de mecanismos como o PSA, especialmente em áreas de nascente e encostas críticas (Pissarra; Sanches; Pacheco, 2021).

Diversos estudos reforçam a importância da análise da declividade em Unidades de Conservação, como é o trabalho de Pissarra, Sanches e Pacheco (2021) que desenvolveram um modelo para produção de água limpa em áreas de cabeceira agrícola considerando o relevo como critério de elegibilidade para PSA.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Medeiros *et al.*, (2023) identificaram a declividade como um dos principais fatores de vulnerabilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Buriticupu, no Maranhão, indicando que o relevo interfere diretamente na conservação dos recursos hídricos.

Por fim, Costa *et al.*, (2024) apontaram a influência da inclinação do terreno na aptidão agrícola, propondo a adoção de técnicas conservacionistas como forma de compatibilizar o uso produtivo com a proteção ambiental. Esses trabalhos demonstram que o relevo deve ser considerado em qualquer proposta de gestão territorial sustentável, especialmente em Áreas de Proteção Ambiental.

As características do relevo ressaltam a importância do planejamento territorial, considerando o risco de erosão e a necessidade de técnicas de conservação do solo e da água (Pissarra; Sanches; Pacheco, 2021).

Conforme representado no mapa geológico (Figura 2D) a divisão da formação geológica da APA Aldeia-Beberibe, evidencia o predomínio marcante da Formação Barreiras e respectivamente as demais classes mapeadas do território da APA Aldeia-Beberibe.

Levando em consideração a Formação Barreiras, a qual é predominante na APA Aldeia-Beberibe, sua estrutura segundo West e Mello (2020) é composta principalmente por sedimentos arenosos e argilosos de origem continental e costeira, característicos de ambientes tropicais úmidos. Sua constituição frágil e pouco coesa a torna altamente suscetível à erosão, especialmente em áreas desprovidas de cobertura vegetal, o que reforça a necessidade de práticas conservacionistas e de proteção ambiental.

A Tabela 11, indica o quantitativo da distribuição espacial da formação geológica na área estudada. A formação Barreiras cobre a maior parte da região com (79,45%) do território, caracterizando solos sedimentares arenosos, comuns em regiões costeiras.

As formações Salgadinho (12,37%) e Surubim-Caroalina (3,10%) e Surubim-Caroalina, quartzito (1,93%) indicam a presença de rochas mais resistentes, que podem influenciar a morfologia da região. Depósitos aluvionares (1,68%) e flúvio-marinhos (0,28%) sugerem processos de sedimentação em áreas de influência fluvial. Pequenas ocorrências das formações Itamaracá (0,41%), Itaporanga (0,75%), Plúton São José (0,03%) demonstram variações geológicas locais.

Tabela 11 - Dados da distribuição da geologia da APA Aldeia-Beberibe.
Table 11 - Geological Distribution Data of the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area.

Geologia	Área (km ²)	Área (%)
Barreiras	251,34	79,45
Depósitos aluvionares	5,30	1,68
Depósitos flúvio-marinhos	0,87	0,28
Itamaracá	1,30	0,41
Itaporanga	2,37	0,75
Plúton São José	0,11	0,03
Salgadinho	39,13	12,37
Surubim - Caroalina	9,82	3,10
Surubim - Caroalina, quartzito	6,10	1,93
Total	316,34	100

Fonte: Os autores, 2026.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

A geologia influencia diretamente a ocupação do solo, a disponibilidade de recursos minerais e a vulnerabilidade a processos erosivos, sendo um fator essencial no planejamento ambiental, agrícola e urbano (Cunha Silva *et al.*, 2024). A formação Barreiras por ser distribuída na maior parte da área influencia diretamente nos recursos hídricos. Os lençóis freáticos rasos ajudam na recarga de aquíferos, mas a retirada da vegetação pode causar erosão acelerada, prejudicando a infiltração da água e a qualidade dos mananciais. (Siqueira *et al.*, 2023).

Cunha Silva *et al.* (2024) apresentaram uma análise integrada da paisagem da APA Serra do Gigante, localizada no município de Itapuranga-GO, mapeando as unidades geológicas para identificação de áreas vulneráveis a processos erosivos, destacando a necessidade de uma gestão ambiental adequada, da importância do planejamento sustentável e da conservação de áreas protegidas, contribuindo para a compreensão da dinâmica paisagística da região e oferecendo subsídios para políticas públicas na gestão de unidades de conservação.

Passo *et al.* (2010) apresentaram um mapeamento geomorfológico detalhado do município de Barreiras – BA, com o objetivo de subsidiar o planejamento territorial frente à intensa expansão agropecuária regional. Concluiu-se que o mapeamento geomorfológico é essencial para o planejamento territorial, servindo como base para políticas públicas voltadas à sustentabilidade ambiental e uso racional dos recursos naturais, especialmente em regiões sob forte pressão agrícola como a Formação Barreiras.

O estudo geológico, geomorfológico e pedológico realizado por Ecologus (2011) na região do Distrito Industrial de São João da Barra - RJ, para a avaliação da aptidão agrícola, visa minimizar os impactos das atividades agrícolas e garantir a sustentabilidade das atividades econômicas planejadas. Os resultados do estudo destacam a necessidade de cuidados especiais no planejamento e implantação de atividades industriais na região. Entre as principais recomendações estão a implementação de medidas robustas de controle erosivo, o monitoramento contínuo do sistema hidrogeológico e a adoção de critérios rigorosos para ocupação do solo.

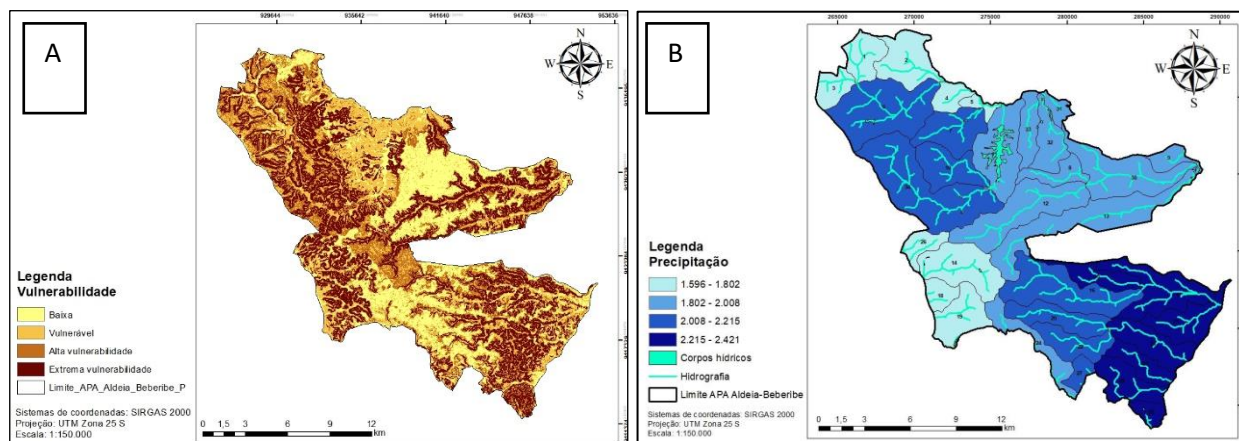
A compreensão da geologia da APA Aldeia-Beberibe é essencial para o planejamento territorial sustentável, pois influencia diretamente a aptidão agrícola, vulnerabilidade à erosão, recarga dos aquíferos e a distribuição dos ecossistemas. A integração dessas informações com os dados de uso e ocupação do solo, declividade e tipos de solo permite identificar áreas prioritárias para recuperação ambiental, implementação de sistemas agroflorestais e PSA (Pissarra; Sanches; Pacheco, 2021).

De acordo com a Lei nº 9.985/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), zonas consideradas mais suscetíveis, que possuem maior risco de erosão e comprometimento hídrico, requerem a implementação de ações de controle adicionais. Essa necessidade eleva os custos do projeto e, por consequência, os valores destinados à compensação.

O mapa de vulnerabilidade da APA Aldeia-Beberibe (Figura 3A) mostra a complexa fragilidade natural da paisagem, onde a estabilidade do terreno está diretamente ligada ao relevo. As áreas de baixa vulnerabilidade correspondem às zonas mais planas, como vales, enquanto as classes de alta e extrema vulnerabilidade dominam as encostas íngremes e topos de morro, que são naturalmente suscetíveis à erosão e deslizamentos causados pela chuva (Rodrigues Neto; Ferreira; Messias, 2023).

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Figura 3: A - Mapa de Vulnerabilidade, B Mapa de precipitação.
Figure 3: A – Environmental Vulnerability Map; B – Precipitation Map.



Fonte: Os autores, 2026.

Contudo, a análise torna-se particularmente crítica ao se cruzar esta informação com a distribuição de chuvas na região em mm/ano (Figura 3B). Portanto, os valores de compensação por PSA foram classificados de acordo com Pissarra, Sanches e Pacheco (2021), (Tabela 12). As áreas classificadas com de baixa vulnerabilidade apresentaram maior representatividade territorial, totalizando 53,24 km², indicando setores com melhores condições de estabilidade ambiental e menor suscetibilidade aos processos de degradação. Nessas áreas, não houve necessidade de acréscimo nos fatores de compensação referentes ao PSA.

Tabela 12 - Dados da distribuição da vulnerabilidade da APA Aldeia-Beberibe.
Table 12- Distribution data of environmental vulnerability in the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area.

Classe de vulnerabilidade	Fator de compensação	Área (km ²)	Área (%)
Baixa	1	57,59	18,20
Vulnerável	1.1	65,35	20,66
Alta vulnerabilidade	1.2	89,65	28,34
Extrema vulnerabilidade	1.3	103,75	32,80
Total		316,34	100

Fonte: Os autores, 2026.

As áreas classificadas como vulneráveis ocuparam 65,35 km² e receberam incremento de 10% no fator de compensação por PSA. Já as áreas de alta vulnerabilidade, com extensão de 89,65 km², apresentaram acréscimo de 20%, enquanto as regiões enquadradas como de extrema vulnerabilidade totalizaram 103,75 km², recebendo os maiores valores de compensação, com incremento de 30%.

As chuvas intensas sobre encostas íngremes, frequentemente desprotegidas pela ocupação agrícola, aumentam drasticamente o perigo de deslizamentos de terra e o carreamento de sedimentos e poluentes para os corpos hídricos, comprometendo a qualidade da água (Carvalho; Silva; Salvio, 2022).

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

As fontes de financiamento para programas de PSA são diversas, podendo incluir aportes de governos, agências internacionais, comunidades locais, concessionárias de água, empresas geradoras de energia hidrelétrica, órgãos de controle de enchentes ou companhias privadas (Brasil, 2024). Em última análise, os custos associados tendem a ser transferidos para os consumidores finais da água (Pissarra; Sanches; Pacheco, 2021).

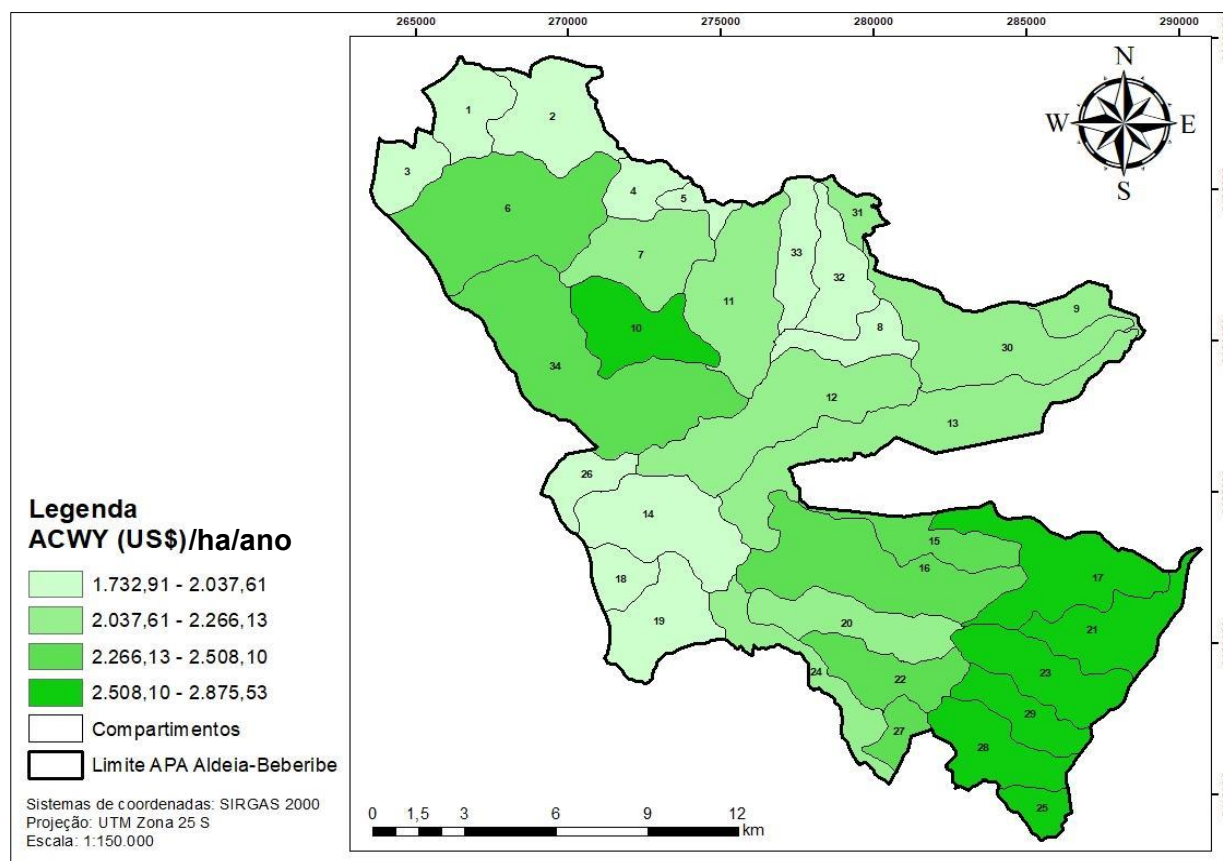
A fragilidade de uma área reflete o peso dos atributos do meio físico na ocorrência de erosão natural e na manutenção da qualidade da água, o que condiciona o tipo e a intensidade das práticas de manejo necessárias em projetos de conversão de uso do solo (Costa *et al.*, 2020).

O mapa de precipitação (Figura 3B) mostra uma acentuada e desigual distribuição de chuvas. Os compartimentos da região noroeste, como os nº 1, 2 e 3 representam áreas com menores índices pluviométricos, com precipitação abaixo de 1.802 mm/ano e a região sul e sudeste se destaca como a mais importante do ponto de vista hídrico. Compartimentos como os nº 24, 25 e 27 recebem os maiores aportes de chuva, acima de 2.215 mm/ano, funcionando como as principais zonas produtoras de água que alimentam os rios da região. As áreas do sul e sudeste são estratégicas e absolutamente prioritárias para políticas de conservação, como proteção de matas e recuperação de áreas. A precipitação (P) variou de 1.596 a 2.421 mm/ano, segundo dados coletados na APAC (2024). Os compartimentos localizados nas regiões mais chuvosas tendem a coletar mais água. Essa variação permitiu classificar os compartimentos com seus respectivos desempenhos hídricos, onde esses valores indicam que o serviço ecossistêmico de provisão de água é bastante diversificado na área.

O mapa do PSA (Figura 4) representa a síntese final do modelo ACWY adaptado, traduzindo a complexa análise de serviços ecossistêmicos em valores em US\$/ha/ano de compensação financeira anual para cada compartimento da APA Aldeia-Beberibe.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Melo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Figura 4: Mapa do Modelo ACWY adaptado da APA Aldeia-Beberibe.
Figure 4: Adapted ACWY Model Map of the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area.



Fonte: Os autores, 2026.

Conforme a Tabela 13, os menores pagamentos estão concentrados em compartimentos como os nº 1, 2, 3, 4, 5, 8, 14, 18, 19, 26, 32 e 33 o que é consistente com declividades menos acentuadas e menores índices de chuva nessa área, resultando em um menor grau de vulnerabilidade, consequentemente, um serviço ambiental de menor valor agregado, entre US\$ 1.732,91 e US\$ 2.037,61 ha/ano, ocupando 74,03 km² (23,41%), refletindo setores com melhores condições de estabilidade ambiental.

A maior parcela territorial concentrou-se na faixa de compensação entre US\$ 2.037,61 e US\$ 2.266,13 ha/ano, em compartimentos como 7, 9, 11, 12, 13, 20, 24, 30 e 31 abrangendo no total de 101,07 km² (31,94%), indicando áreas que demandam incentivos moderados para conservação ambiental.

Os valores de compensação entre US\$ 2.266,13 e US\$ 2.508,53 ha/ano referente aos compartimentos 6, 15, 16, 22, 27 e 34, somando 82,54 km² (26,10%), correspondendo a áreas com maior fragilidade ambiental e necessidade mais intensa de ações conservacionistas.

Por outro lado, a menor participação percentual em área ocorreu nos compartimentos nas regiões sul e sudeste, como os de nº 10, 17, 21, 25, 28 e 29 possuindo maior compensação econômica, entre US\$ 2.508,53 e US\$ 2.875,53 ha/ano, totalizando 58,70 km² (18,55%). Apesar da menor extensão, essas áreas

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

representam os setores mais críticos da APA, exigindo maiores investimentos para conservação e recuperação ambiental.

Tabela 13 - Valores de Pagamento por Serviço Ambiental para APA Aldeia-Beberibe.
Table 13 - Payment for Environmental Services values for the Aldeia-Beberibe Environmental Protection Area.

Compartimentos	Valores de PSA US\$/ha/ano	Área (km ²)	Área (%)
1,2,3,4,5,8,14,18,19,26,32,33	1.732,91 - 2.037,61	74,03	23,41
7,9,11,12,13,20,24,30,31	2.037,61 - 2.266,13	101,07	31,94
6,15,16,22,27,34	2.266,13 - 2.508,53	82,54	26,10
10,17,21,23,25,28,29	2.508,53 - 2.875,53	58,70	18,55
Total		316,34	100

Fonte: Os autores, 2026.

O alto valor dessas áreas se justifica pela combinação de múltiplos fatores positivos, elas não só têm a capacidade de captar o maior percentual hídrico, gerando mais água, como também possuem terrenos de alta vulnerabilidade, tornando sua conservação mais crítica para evitar erosão e contaminação de corpos hídricos por resíduos agrícolas. A qualidade da água vem sendo comprometida por práticas agrícolas intensivas que impõem a necessidade de transição para sistemas mais sustentáveis, como os agroflorestais, que conciliam produção e conservação (Pinheiro *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 2024).

O modelo ACWY aborda essa questão optando por uma abordagem de incentivo, na qual os usuários de água limpa financiam a mudança e os agricultores são compensados, ao invés de aplicar o princípio do poluidor-pagador. Essa escolha reconhece a produção de alimentos como uma atividade essencial que deve ser apoiada em sua trajetória para a sustentabilidade. A iniciativa possui um caráter multissetorial, visando garantir a provisão de água de qualidade para múltiplos usos, o que abrange desde a sustentabilidade das atividades agrícolas até a segurança hídrica para o consumo humano nas cidades.

A implementação prática de modelos como o ACWY enfrenta obstáculos significativos, apesar de existir um sólido arcabouço legal de apoio, como o Código Florestal de 2012 e resoluções sobre serviços ambientais.

Pissarra, Sanches e Pacheco (2021) destacam que os principais entraves são a falta de políticas públicas e a incerteza quanto às fontes de financiamento. A superação desse desafio financeiro poderia ocorrer pela mobilização de recursos de fontes como companhias de abastecimento, fundos de incentivo à produção sustentável e bancos de crédito hídrico, viabilizados pelo instrumento de cobrança pelo uso da água.

As áreas com maior vulnerabilidade ambiental modeladas na APA Aldeia-Beberibe, identificadas por meio da integração de variáveis ambientais pelo método AHP, coincidem com as áreas prioritárias para a implementação de programas de PSA. Além disso, pressupõe-se que a aplicação do modelo adaptado do ACWY atribuirá maiores valores de compensação financeira as compartimentalizações hidrológicas que apresentarem simultaneamente elevada vulnerabilidade ambiental e maior capacidade de conservação do solo e da água.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

Dessa forma, a análise técnica do ACWY se torna uma ferramenta de gestão estratégica para a implementação de um programa de PSA, permitindo remunerar de forma justa e proporcional aqueles cujas áreas prestam os serviços ecossistêmicos mais valiosos para a segurança ambiental e hídrica de toda a APA Aldeia-Beberibe.

CONCLUSÃO

O mapeamento resultante da aplicação do modelo adaptado ACWY apresentou relevância para a determinação das áreas passíveis de recebimento do PSA, onde a área com maior potencial conta com 18,55% da APA, apresentando uma projeção monetária de 2.508,53 - 2.875,53 US\$/ha/ano e a área com menor potencial corresponde a 23,41% 1.732,91 - 2.037,61 US\$/ha/ano, demonstrando que a distribuição espacial dos valores de compensação financeira estão de acordo com o grau de vulnerabilidade ambiental da compartimentalização hidrológica da APA Aldeia-Beberibe.

Os maiores valores de compensação financeira foram atribuídos às áreas ambientalmente mais frágeis, onde, maiores índices pluviométricos possuem maior potencial de contribuição para a manutenção dos recursos hídricos, demonstrando que o modelo ACWY adaptado com o fator P conseguiu associar de forma eficiente os serviços ecossistêmicos prestados pelas propriedades rurais ao incentivo econômico necessário para sua conservação.

Além disso, o ACWY adaptado representa uma alternativa viável ao cálculo do PSA em áreas que não são caracterizadas efetivamente como bacias hidrográficas, assim, como áreas que não possuem a disponibilidade de dados para o cálculo do $Q_{7,10}$.

O modelo ACWY adaptado serve como base para o incentivo de adoção de práticas sustentáveis, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas, em Unidades de Conservação e propriedades rurais reduzindo impactos ambientais decorrentes do uso inadequado do solo e fortalecimento da gestão ambiental.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). **Site institucional**. Recife: APAC, 2024.

ASSOULINE, S. What Can We Learn From the Water Retention Characteristic of a Soil Regarding Its Hydrological and Agricultural Functions? Review and Analysis of Actual Knowledge. **Water Resources Research**, v. 57, e2021WR031026, 2021. DOI: doi.org/10.1029/2021WR031026

BRAGA, S. E.; CALDAS, A. M.; RIZZI NETO, E.; SILVA, L. J. S.; LUSTOSA PERÔNICO, A. M. B.; WANDERLEY, R. A.; FREITAS, P. M. L.; LIMA, J. R.; CUNHA, C. R. R. O.; SILVA ABREU, B. Environmental conflict of land use in Tapacurá-PE hydrographic basin. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. e52310212833, 2021. DOI: [10.33448/rsd-v10i2.12833](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12833)

BRASIL. Grupo de Trabalho sobre Meio Ambiente e Sustentabilidade Climática (ECSWG). Payment for Ecosystem Services (PES): scaling up PES to meet global environmental and climate crises. **Technical paper**. Brasília, DF: Governo Federal, 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 14 jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ed. 138, p. 1, 19 jul. 2000.

CALDAS, A. M.; PISSARRA, T. C. T. Environmental conflicts in municipality areas: land use policy for zoning regulation. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação, Uberaba - MG**, v. 7, n. 2, p. 70–83, 2023. DOI: [10.18554/rbcti.v7i2.6981](https://doi.org/10.18554/rbcti.v7i2.6981)

CARVALHO, G. O. T.; SILVA, N. C.; SALVIO, G. M. M. Vulnerabilidade ambiental em Áreas de Proteção Ambiental (APA) do Bioma Mata Atlântica na região sudeste brasileira. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 1575–1593, 2022. DOI: [10.5902/1980509867261](https://doi.org/10.5902/1980509867261)

COELHO, N. R.; GOMES, A. S.; CASSANO, C. R.; PRADO, R. B. Panorama das iniciativas de pagamento por serviços ambientais hídricos no Brasil. **Engenharia Sanitaria E Ambiental**, v. 26, n. 3, p. 409–415, 2021. DOI: [10.1590/S1413-415220190055](https://doi.org/10.1590/S1413-415220190055)

COSTA, A. M.; SILVA, L. H.; SILVA, V. C.; MOURA, M. S.; MOTA, P. K.; ARAÚJO, B. J. R. S. Potencial de Uso Conservacionista (PUC) e Uso e Cobertura do Solo na Bacia Hidrográfica do Córrego Guavirá, PR. **Perspectiva Geográfica**, [S. l.], v. 14, n. 20, p. 107–122, 2020.

COSTA, A. M.; COSTA, A. D.; MOURA, M. S.; NAVARRO, I. F.; SILVA, V. C.; PISSARRA, T. C. T.; VALERA, C. A.; FERNANDES, L. F. S.; FERNANDES, L. A.; PACHECO, F. A. L.; PACHECO, F. F. Ecosystem services potential and soil conservation policies with emphasis on degraded pastures in Brazil. **Geography and Sustainability**, v. 5, n. 4, p. 660–672, 2024. DOI: [10.1016/j.geosus.2024.07.010](https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.07.010)

COSTA, J. T. F.; COSTA, V. S. O pagamento por serviços ambientais: uma análise para o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar do Rio Grande do Sul. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 10172–10186, 2022. DOI: [10.34117/bjdv8n2-114](https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-114)

CPRH – AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE PERNAMBUCO. **APA Aldeia-Beberibe**. Recife: CPRH, 4 fev. 2021.

CUNHA SILVA, G. R.; CUNHA SILVA, G. R.; SOUSA, V. R.; BERNARDES, M. M.; DE SOUZA, J. C.; DE-CARVALHO, P. S.; DE MIRANDA, S. C.; SILVA-NETO, C. E. Análise integrada da paisagem na APA Serra do Gigante no município de Itapuranga-GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 1862–1874, 2024. DOI: [10.26848/rbqf.v17.3.p1862-1874](https://doi.org/10.26848/rbqf.v17.3.p1862-1874)

DALLA PRIA, A.; DIEDERICHSEN, A.; KLEMM, C. Pagamento por Serviços Ecológicos: uma estratégia para a conservação ambiental em regiões agrícolas produtivas do Brasil? **Sustentabilidade em Debate**, v. 4, n. 1, p. 317–340, 2013. DOI: [10.18472/SustDeb.v4n1.2013.9216](https://doi.org/10.18472/SustDeb.v4n1.2013.9216)

Diário Oficial do Estado de Pernambuco: seção 1, Recife, PE, 18 mar. 2010.

ECOLOGUS. **Estudo de impacto ambiental – EIA**: infraestruturas do Distrito Industrial de São João da Barra. São João da Barra: Ternium Brasil, 2011.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 393 p. ISBN 978-65-5467-104-0.

FREY, G. E.; FREY, G. E.; KALLAYANAMITRA, C.; WILKENS, P.; JAMES, N. A. Payments for forest-based ecosystem services in the United States: magnitudes and trends. **Ecosystem Services**, v. 52, p. 101377, 2021. DOI: [10.1016/j.ecoser.2021.101377](https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101377)

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Melo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

HAAVISTO, R.; SANTOS, D.; PERRELS, A. Determining payments for watershed services by hydro-economic modeling for optimal water allocation between agricultural and municipal water use. **Water Resources and Economics**, v. 26, p. 100127, 2019. DOI: [10.1016/j.wre.2018.08.003](https://doi.org/10.1016/j.wre.2018.08.003)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cana-de-açúcar**: produção em Pernambuco. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas territoriais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

LIMA, R. S.; MARQUES, J. S. Payment for environmental services as an inducing instrument for family farming. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 5, p. e18412541695, 2023. DOI: [10.33448/rsd-v12i5.41695](https://doi.org/10.33448/rsd-v12i5.41695)

LOBO DE PAIVA, A. M.; AMARO, V. E. ; DI LOLLO, J. A. ; COSTA, C. W. . Fragilidade Ambiental aplicada em área de manancial no Nordeste brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 128–147, 2022. DOI: [10.21680/2447-3359.2022v8n1ID24368](https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1ID24368)

MAPBIOMAS. **Coleções MapBiomias**: projeto de mapeamento anual do uso e cobertura da terra no Brasil. São Paulo: MapBiomias, 2023.

MEDEIROS, R. B; SANTOS, L. C; BEZERRA, J. F. R; SILVA, Q. D; MELO, S. N. Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Buriticupu, Maranhão - Brasil: O Relevo como Elemento Chave. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 1, 2023. DOI: [10.14393/SN-v35-2023-66679](https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-66679)

MEDEIROS, R. M.; DE HOLANDA, R. M.; VIANA, M. A.; SILVA, V. P. CLIMATE CLASSIFICATION IN KÖPPEN MODEL FOR THE STATE OF PERNAMBUCO - BRAZIL. **Revista De Geografia**, v. 35 n. 3, p. 219–234, 2018. DOI: [10.51359/2238-6211.2018.229388](https://doi.org/10.51359/2238-6211.2018.229388)

MEDEIROS, R. M.; HOLANDA, R. M.; FRANÇA, M. V.; SABOYA, L. M. F.; ROLIM NETO, F. C.; ARAÚJO, W. R.; PEREIRA, M. L. F. Classificação climática de Köppen na Zona da Mata Pernambucana – Brasil. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 5, p. 1–21, 2021. DOI: [10.51359/2238-6211.2018.229388](https://doi.org/10.51359/2238-6211.2018.229388)

MELO, M. C.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T.; VALERA, C. A.; DA COSTA, A. M.; PACHECO, F. A. L. The COP27 screened through the lens of global water security. **The Science of the total environment**, v. 873, 162303, 2023. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.162303](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162303)

MOTA, P. K.; DA COSTA, A. M.; PRADO, R. B.; FERNANDES, L. F.; PISSARRA, T. C. T.; PACHECO, F. A. L. Payment for Environmental Services: A critical review of schemes, concepts, and practice in Brazil. **Science of the total environment**, **JCR**, v. 899, p. 165639, 2023. DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165639

PARRAS, R.; MENDONÇA, G. C.; COSTA, L. M.; ROCHA, J. R.; COSTA, R. C. A.; VALERA, C. A.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L.; PISSARRA, T. C. T. Land use footprints and policies in Brazil [Internet]. **Land Use Policy**, v. 140, p. 1-15. 2024. DOI: doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107121

PASSO, D. P.; MARTINS, E. S.; GOMES, Marisa Prado; REATTO, A.; CASTRO, K. B.; LIMA, L. A. S.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T. **Caracterização geomorfológica do município de Barreiras, Oeste Baiano, escala 1:100.000**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 30 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 294).

PERNAMBUCO. **Decreto nº 34.692, de 17 de março de 2010**. Declara como Área de Proteção Ambiental – APA a região que compreende parte dos Municípios de Camaragibe, Recife, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Araçoiaba, São Lourenço da Mata e Paudalho, e dá outras providências.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL: ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa, Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

PINHEIRO, A.; SCHOEN, C.; SCHULTZ, J.; HEINZ, K. G. H.; PINHEIRO, I. G.; DESCHAMPS, F. C. Relação Entre o Uso do Solo e a Qualidade da Água em Bacia Hidrográfica Rural no Bioma Mata Atlântica. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 127-139, jul./set. 2014. DOI: doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p127-139

PISSARRA, T. C. T.; COSTA, R. C. A.; CALDAS, A. M.; RODRIGUES, F. M.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. Methodological proposal for Payments for Environmental Services (PES) aiming to produce clean water in springs. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 44, Ed. Esp. VI SSS, e23, 2022. DOI: [10.5902/2179460X69453](https://doi.org/10.5902/2179460X69453).

PISSARRA, T. C. T.; SANCHES, L. F. F.; PACHECO, F. A. L. Production of clean water in agriculture headwater catchments: a model based on the payment for environmental services. **Science of the Total Environment**, v. 785, p. 147331, 2021. [10.1016/j.scitotenv.2021.147331](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147331)

REYNAUD SCHAEFER, C. E. G. R.; SIQUEIRA, R. G.; PEREIRA, L. F.; GOMES, L. C.; ALMEIDA, P. H. A.; FRANCELINO, M. R.; FIRMINO, F. H. T.; SOUZA, J. J. L.; KER, J. C.; FERNANDES-FILHO, E. I. Brazilian Latossolos (Ferralsols, Oxisols) from different biomes: a multiproxy study on the spatial variability of the most weathered tropical soils in South America. **Geoderma Regional**, v. 43, e01012, 2025. ISSN 2352-0094. DOI: doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e01012.

RODRIGUES NETO, M. R.; FERREIRA, M. F. M.; MESSIAS, C. G. Mapeamento Da Fragilidade Ambiental A Processos Erosivos No Parque Estadual Serra Da Boa Esperança (MG), BRASIL. **GEOgraphia**, Niterói, v. 25, n. 55, 2023. DOI: [10.22409/GEOgraphia2023.v25i55.a51506](https://doi.org/10.22409/GEOgraphia2023.v25i55.a51506)

RODRIGUES, F. M. Mapping for Environmental Planning the Basin of Córrego Rico, São Paulo. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 3, n. 3, p. 045–058, 2013. DOI: doi.org/10.29150/jhrs.v3.3.p045-058

RODRIGUES, F.; PISSARRA, T. C. T. Mapeamento de áreas de preservação permanente e conflitos da bacia hidrográfica do correjo rico, Jaboticabal - SP. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 75 - 83, dez. 2015. ISSN 1984-7548. DOI: doi.org/10.5935/PAeT.V7.N3.09.

ROQUE, R. A. L.; PIERRI, A. C. Intelligent use of natural resources and sustainability in civil construction. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 2, p. e3482703, 2019. DOI: doi.org/10.33448/rsd-v8i2.703

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008.

SAATY, T. L. Scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, San Diego, v. 15, p. 234-281, 1977.

SANTOS, C. A.; LIMA, F. J. C. **Mapa geológico do estado de Pernambuco**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2023.

SILVEIRA, J. S.; LOPES, F. A. Inconformidade do enquadramento de corpos d'água em Unidades de Conservação de Proteção Integral: proposta de revisão para a bacia do Ribeirão da Prata – Parque Nacional Serra do Gandarela – Minas Gerais. **Revista Geografias**, v. 18, n. 1, p. 1–20, 2022. DOI: doi.org/10.35699/2237-549X.2022.37570

SIQUEIRA, T. S.; PESSOA, L. A.; VIEIRA, L.; CIONEK, V. M.; SINGH S. K.; BENEDITO, E.; COUTO, E. V. *Evaluating land use impacts on water quality: perspectives for watershed management*. **Sustainable Water Resources Management**, v. 9, n. 192, 2023. DOI: doi.org/10.1007/s40899-023-00968-2

SPERA, S. T.; REATTO, A.; MARTINS, É.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F. Solos e aptidão agrícola das terras da Área de Proteção Ambiental de Cafuringa, Distrito Federal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 54 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados, 45). ISSN 1676-918X.

MODELAGEM ESPACIAL PARA PRIORIZAÇÃO E VALORAÇÃO DE PAGAMENTOS POR SERVIÇOS AMBIENTAIS EM ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL:
ESTUDO DE CASO DO MODELO ACWY ADAPTADO E POTENCIAL CLIMÁTICO DE PROVISÃO HÍDRICA
Igor Lima de Oliveira, Artur Felizardo Laurênio de Melo, Fernando Cartaxo Rolim Neto, Alexandre Marques Ribeiro de Oliveira, Ralini Ferreira de Mélo, Marcus Metri Correa,
Ioneide Alves de Souza, Francinete Francis Lacerda, Ricardo Andrade Wanderley, Anildo Monteiro Caldas

VIEIRA, I. F. B.; ROLIM NETO, F. C.; CARVALHO, M. N.; CALDAS, A. M.; COSTA, R. C.A.; SILVA, K. S.; PARAHYBA, R. B. V.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T. Avaliação da segurança hídrica da qualidade das águas subterrâneas em uma área rural antropizada do bioma Mata Atlântica no Brasil. **Water**, v. 12, 623, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12030623>

VILA NOVA, F. V. P.; TORRES, M. F. A.; ARECES MALLEA, A. Vulnerabilidade florestal à cobertura e uso do solo em área de proteção ambiental estuarina de Pernambuco. **Ra'e Ga: o Espaço Geográfico em Análise**, [S. l.], v. 53, p. 3–21, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v53i0.69871>

WEST, D. C.; MELLO, C. L. Distribuição da Formação Barreiras na região sul do Espírito Santo e sua relação com a deformação neotectônica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1667>