

AVALIAÇÃO DE RESILIÊNCIA DA COBERTURA VEGETAL A PARTIR DE ANÁLISE DE PERSISTÊNCIA DE DADOS NDVI

Fernanda França Ferreira¹, Otto Corrêa Rotunno Filho¹ e Vitor Paiva Alcoforado Rebelo¹

¹ Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Horácio Macedo, Bloco I, 101 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro, fernanda.f@poli.ufrj.br, otto@coc.ufrj.br; vitoralcoforado@gmail.com

RESUMO

O trabalho objetiva analisar a evolução da vegetação da bacia hidrográfica do rio Itapemirim usando metodologia desenvolvida, inicialmente, por [1], onde dados de NDVI são computados a fim de verificar tendências negativas e positivas no seu crescimento, critério que permite classificá-las quanto a sua persistência. Adicionalmente, são calculadas as probabilidades de que determinada persistência se mantenha até dado tempo, assim como o tempo de vida médio (Γ) para o decaimento dessa probabilidade, relacionado a seu tempo médio de recuperação. Para uma vegetação saudável, espera-se que os tempos médios de vida para as persistências positivas sejam superiores às negativas. O valor de Γ das persistências positivas para a bacia foi 17,1 anos, enquanto das negativas foi 12,3 anos, denotando vegetação saudável. Por outro lado, a análise das pastagens (Γ positivo: 12,2; Γ negativo: 15,4 anos) mostra que existe uma tendência de degradação desse tipo de uso do solo, podendo indicar baixa capacidade de resiliência.

Palavras-chave — Resiliência da vegetação, Análise de persistência, NDVI.

ABSTRACT

This work aims to analyze the evolution of the vegetation of the Itapemirim river basin using methodology developed by [4], where NDVI data are computed in order to verify negative and positive trends in its growth, a criterion that allows to classify them with respect to its persistence. In addition, the probabilities that a given persistence is maintained for a given time, as well as the mean lifetime (Γ) for the decay of this probability, related to its mean recovery time, are calculated. For healthy vegetation it is expected that the mean lifetime for positive persistence will be higher than the negative ones. The value of Γ of the positive persistence for the basin was 17.1 years, while for the negative ones was 12.3 years, denoting healthy vegetation. On the other hand, the analysis of pastures (Γ positive: 12.2; Γ negative: 15.4 years) shows that there is a tendency of degradation of this type of soil use, which may indicate low resilience capacity.

Key words — *Vegetation resilience, Persistence analysis, NDVI.*

1. INTRODUÇÃO

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é bem estabelecido na literatura, que resulta da combinação dos valores de reflectância em dois intervalos de comprimento de onda, infravermelho próximo e vermelho, estando intimamente relacionado com a quantidade e com o estado da vegetação em uma dada área da superfície terrestre [2].

A dinâmica da cobertura vegetal possui impacto sistemático sobre o balanço de energia e sobre o balanço hídrico de uma bacia [1]. A detecção e a caracterização de mudanças de padrões é frequentemente o primeiro passo para entender os mecanismos e identificar as correspondentes forças atuantes [3].

Os ecossistemas e o clima influenciam-se mutuamente em diversas escalas de tempo, o que inclui resposta de curto prazo da vegetação e do solo aos processos atmosféricos, bem como a evolução a longo prazo de ecossistemas e estrutura do solo [1].

Mudanças no uso da terra, manejo da terra e pressão humana podem realmente afetar as variáveis hidroclimáticas (por exemplo, precipitação e temperatura) em escala local e global. No contexto das mudanças de padrões climáticos, a avaliação das respostas da vegetação ao estresse e a avaliação de sua capacidade de acompanhar mudanças e / ou recuperar-se de distúrbios são fundamentais [4].

A resiliência da vegetação é a medida de seu tempo de recuperação em resposta a um impacto no ambiente [5]. Quanto mais alta a resiliência, menor seu tempo de recuperação. Espera-se que a resiliência seja reduzida em áreas afetadas por estresse prolongado de origem antrópica ou climática.

A fim de analisar séries temporais, diversos estudos sobre análises de tendências de dados de NDVI têm sido realizados, como [4], [1], [3] e [6], entre outros.

O presente trabalho utiliza dados de NDVI fornecidos pelo sensor MODIS para analisar a série temporal da bacia do rio Itapemirim de acordo com a metodologia desenvolvida por [1]. Esse método estima a probabilidade de persistência da vegetação, o que permite a estimativa do tempo médio de recuperação, medida relativa à resiliência da vegetação [4]. A técnica pode ter uma interessante aplicação para o

entendimento da dinâmica de diferentes categorias de vegetação, inclusive acompanhamento de tipos de cultura.

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Itapemirim está localizada no sul do estado do Espírito Santo. Abrange integralmente dez municípios e parcialmente outros nove, perfazendo área de contribuição de aproximadamente 5.919,5 km².

São três as principais formas de uso solo da bacia, totalizando 75% de sua área: pastagens (44%), cultivo de café (14%) e mata nativa (17%) [7].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Preparação dos dados

Os dados utilizados neste trabalho foram fornecidos pela NASA, resultado da missão MODIS, sensor TERRA, produto MOD13Q1, com resolução espacial de 250 m, que fornece o NDVI em uma base discriminada por píxel. O algoritmo para esses produtos escolhe o melhor valor de píxel disponível de todas as aquisições realizadas ao longo do período de 16 dias. As séries de dados MODIS utilizadas foram de 2000 a 2015.

Para a análise, foram realizadas composições máximas anuais com os dados de NDVI [8], a fim de obter um mapa com parâmetros não influenciados por padrões de sazonalidade, que, todavia, possibilitassem a estimativa das variações interanuais de atividade da vegetação.

3.2. Análise de persistência

O método de análise de persistência utilizada, neste trabalho, consiste na avaliação das tendências positivas ou negativas dos dados de NDVI. A análise é feita píxel a píxel, levando em consideração as mudanças nos valores de NDVI, ano a ano, mediante adaptação da metodologia proposta por [1].

Esta análise não leva em consideração o quantitativo das mudanças no índice. Trata-se de uma ferramenta para apontar tendências negativas e positivas, e o tempo que essas tendências persistem e seu tempo médio de recuperação. Apenas os sinais das tendências são analisados para o cálculo da persistência.

Chama-se aqui de $s(x, y, t)$ a superfície de tendência. Ela é composta pelos sinais de tendência em um período $[0, t]$ e é definida atribuindo o valor 1 aos píxeis (x, y) , onde uma tendência positiva é detectada no período, caso contrário o valor atribuído é de -1. Dessa forma, a superfície de tendência $s(x, y, t)$ é uma matriz de dados onde os valores atribuídos são 1 e -1, dependendo se a tendência do NDVI é positiva ou negativa na série temporal.

No tempo inicial $t = t_i$, a superfície $s(x, y, t_i)$ é construída. Progressivamente, os dados dos anos seguintes são adicionados, e a persistência é registrada no mapa de

persistência $P(x, y, t)$, que, por sua vez, é construído de acordo com a regra.

$$P(x, y, t_i) = s(x, y, t_i)$$

$$P(x, y, t) = \begin{cases} 0 & \text{se } (x, y, t) \neq P(x, y, t-1) \\ P(x, y, t-1) & \text{se } (x, y, t) = P(x, y, t-1) \end{cases}$$

Para cada píxel (x, y) , seu valor de P acumulado será uma indicação do número de anos durante os quais as flutuações interanuais não conseguiram alterar a tendência inicial, e seu sinal indica se a tendência era de aumentar ou diminuir o valor do NDVI. Dessa forma, uma tendência é considerada persistente se permanece com mesmo sinal do período inicial.

3.3. Probabilidade de persistência

A probabilidade de persistência $q(t)$ calcula a probabilidade de que a flutuação de um campo $X(x, y; t')$ desvie do nível de referência para um intervalo de tempo t , antes de voltar para o correspondente nível [4]. Se focarmos em $X - X_r$ (sendo X_r o nível de referência), tem-se que observar o sinal das flutuações, sendo que $q(t)$ é a probabilidade que esse sinal nunca tivesse mudado desde o tempo inicial.

A probabilidade de persistência é definida como:

$$q(t) = \frac{N(t)}{N(t_i)}$$

onde $N(t)$ é o número de valores com persistência positiva igual ao tempo t , ou seja, a quantidade de píxeis que não tiveram sua tendência positiva ou negativa alterada até o tempo t . $N(t_i)$ é o número de píxeis com determinado sinal do período de referência.

A probabilidade de persistência, como mostrado por [1], pode ser ajustada a uma função exponencial do tipo $e^{-\frac{t}{\Gamma}}$ a fim de determinar o valor de Γ , que representa o tempo médio de vida da função. O tempo médio de vida (Γ) representa o tempo que determinada tendência sobrevive até que ela decaia. Quanto maior o valor de Γ , maior é a persistência da tendência.

A técnica utilizada, neste trabalho, desenvolvida por [1], pressupõe que todas as flutuações observadas sejam realmente geradas pela dinâmica que estamos tentando caracterizar. A variabilidade de ano para ano da cobertura vegetal inclui um alto teor de variabilidade errática. Assim, a fim de caracterizar a resiliência, concentraram-se esforços na delimitação das tendências do NDVI e não nas flutuações do NDVI em si [4].

Na prática, estudou-se a tendência da atividade da vegetação em persistir em aumentos ou decréscimos desde o tempo inicial, de modo a caracterizar comportamentos de longo prazo.

Assim como realizado em [4], não foi aplicado limiar com base na confiança estatística tendencial. Tal escolha foi feita porque o objetivo não é detectar mudança, mas estudar comportamentos coletivos da atividade da vegetação, avaliando se as flutuações interanuais tendem a se integrar construtivamente (persistência positiva) ou destrutivamente (persistência negativa). No contexto de modelos climáticos e hidrológicos, a correlação espacial da resiliência da vegetação é uma propriedade importante, assim como a correlação temporal. Quando tendências de baixa significância são agregadas no espaço, sua correlação espacial indica um comportamento coletivo que não pode ser considerado aleatório.

3. RESULTADOS

A Figura 1 apresenta o resultado da persistência dos dados de NDVI para a bacia do Itapemirim.

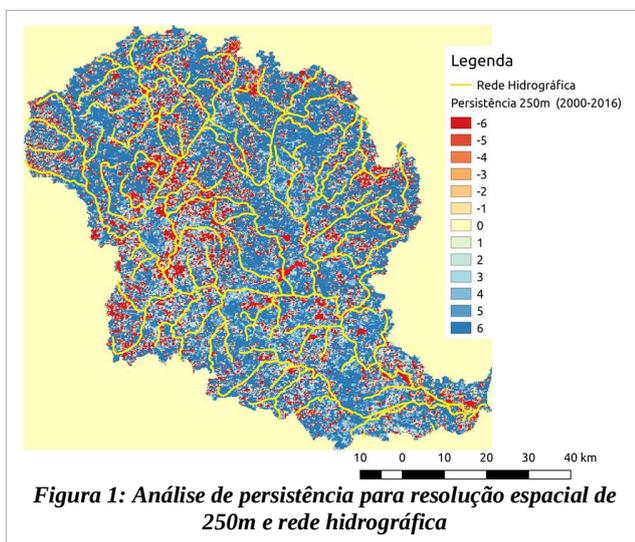


Figura 1: Análise de persistência para resolução espacial de 250m e rede hidrográfica

As persistências positivas representam 75% da área analisada, enquanto que as persistências negativas representam 25%. A maior parte dos píxeis apresentam persistência longa e positiva.

A Figura 2 mostra o cálculo da probabilidade de persistência com o ajuste dos dados à equação exponencial para o total da bacia e para três tipos de vegetação: pastagem, mata nativa e cultivo de café.

Para os tipos de uso do solo analisados, observação das curvas de probabilidade de persistências mostra que as curvas negativas decaem mais rapidamente que as positivas, com exceção da pastagem. A inversão na velocidade de decaimento para esse último uso do solo, pode ser indicativa de condições de estresse, tendendo as pastagens a constituírem áreas degradadas. O café apresenta o maior decaimento positivo, seguido da vegetação nativa.

A Tabela 1 apresenta o tempo médio de vida da bacia e dos usos do solo obtidos através do ajuste dos dados de probabilidade à equação exponencial e o intervalo de

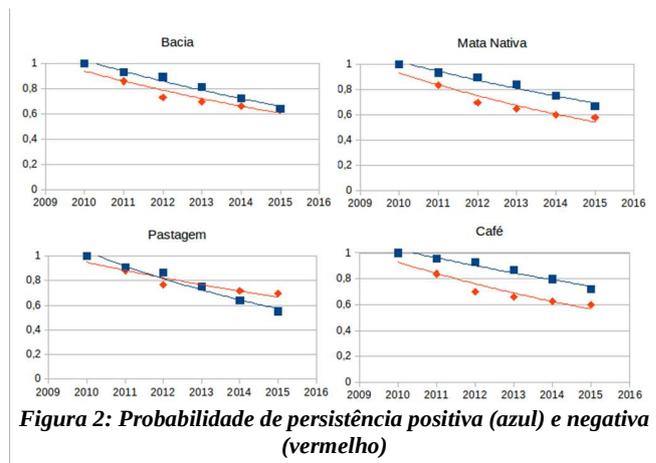


Figura 2: Probabilidade de persistência positiva (azul) e negativa (vermelho)

confiança de 95%. O coeficiente de determinação (R^2) representa uma medida de ajuste ao modelo. O tempo médio de vida das tendências negativas para a bacia é de 12,3 anos. As tendências positivas possuem decaimento mais lento, com tempo médio de vida de 17,1 anos.

Tabela 1: Tempo médio de vida e coeficiente de ajuste da curva exponencial para o cálculo de probabilidade de persistência para a área total da bacia e para cada tipo de uso do solo

	Positivo			Negativo		
	Vida Média (anos)	Intervalo de confiança 95%	R^2	Vida Média (anos)	Intervalo de confiança 95%	R^2
Bacia	17,1	11,86 - 22,34	0,86	12,29	9,63 - 14,94	0,90
Café	23,76	15,77 - 31,75	0,83	10,68	8,27 - 13,10	0,89
Mata Nativa	19,18	13,35 - 25,02	0,86	10,16	7,94 - 12,38	0,90
Pastagem	12,17	8,66 - 16,90	0,85	15,40	11,78 - 18,31	0,89

4. DISCUSSÃO

Os tempos médios de recuperação para uma área dependem de muitos fatores relacionados ao tipo de vegetação, recursos, clima local, entre outros. Na presença de recursos suficientes, assimetrias em padrões negativos e positivos é o resultado esperado, uma vez que a vegetação tende a se desenvolver. Este é o caso avaliado na bacia do Itapemirim, onde o tempo médio de vida das persistências positivas é superior às persistências negativas. Qualquer desvio desse cenário é uma indicação de comportamentos coletivos de baixa resiliência, caso específico das pastagens.

Em uma primeira análise, é possível observar que os valores de persistência são bem dispersos pela bacia. A não existência de grandes grupamentos de persistência deve-se ao fato da pequena extensão da bacia, que apresenta condições hidrológicas e climáticas homogêneas, segundo estudos de [9] e [10]. Dessa forma, as variações na persistência estão mais associadas ao uso do solo do que às irregularidades nos padrões hidroclimatológicos.

Apesar do bom ajuste dos dados de probabilidade de persistência (R^2) à função exponencial, o cálculo do tempo médio de vida conta com um erro substancial, cerca de 30% para os positivos e 20% para os negativos, devendo-se levar em consideração a pequena quantidade de dados para o ajuste da reta. No entanto, é importante resaltar que o objetivo não é encontrar quantitativamente o tempo médio de vida e sim comparar os decaimentos positivos e negativos. A defasagem entre essas duas curvas que pode ser um indicativo da condição da vegetação no longo prazo.

A persistência positiva não implica necessariamente que o NDVI tenha progressivamente aumentado ao longo de todo o período investigado e que aumentará no futuro. Coloca em evidência que a vegetação ainda não retornou à condição inicial e que há uma boa probabilidade de que não retornará aos níveis de referência por um longo tempo. A assimetria entre os tempos de decaimento das flutuações positivas e negativas, que caracterizam a vegetação da bacia, mostram a boa capacidade de resiliência da vegetação.

O resultado da análise de áreas de cultivo de café apresentam longas persistências positivas. Áreas cultivadas, nesse tipo de análise, responderão não apenas segundo características naturais da vegetação, porém também quanto a efeitos de ações de controle antrópico. Logo sua variação interanual não representa puramente a dinâmica da vegetação, pois está submetida a manejos como poda, uso de fertilizante e eventual irrigação.

As pastagens são um uso do solo que devem requerer atenção na bacia, pois seu decaimento negativo longo mostra uma tendência de degradação. Um estudo realizado para a Zona da Mata Mineira [5] empregou um outro tipo de análise de persistência de séries temporais de NDVI com determinação do expoente de Hurst e detectou áreas de pastagem passíveis de degradação.

5. CONCLUSÕES

A análise dos dados de NDVI para a bacia do Itapemirim foi realizada através da estimativa da probabilidade de persistência e análise de decaimento da probabilidade com o tempo de vida médio. Valores de tendências positivas e negativas foram comparadas a fim de extrair informações sobre o estado da vegetação.

De forma geral, a bacia apresenta valores longos de persistências positivas, o que indica uma boa saúde da vegetação. A presença de persistências negativas longas em detrimento da persistências positivas, como no caso da análise das pastagens, podem ser interpretadas como um sinal de redução na capacidade de resiliência desse tipo de vegetação.

A estimativas de persistência de NDVI parece ser uma ferramenta promissora para o mapeamento de áreas de vulnerabilidade à degradação com perspectiva de longo prazo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as bolsas de estudos de mestrado e de doutorado concedidas pelo CNPq. Agradecimentos são estendidos à CAPES – Código de Financiamento 001, à FAPERJ, por meio dos projetos FAPERJ – Pensa Rio – Edital 34/2014 (2014-2017) – E-26/010.002980/2014, FAPERJ No. E-12/2015 e FAPERJ No. E-22/2016, bem como ao suporte oferecido pelo CNPq por meio do projeto Edital No. 12/2016 – Processo 306944/2016-2 e projeto Edital Universal No. 14/2013 – Processo 485136/2013-9.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Lanfredi, M.; Simoniello, T.; Macchiato, M. Temporal persistence in vegetation cover changes observed from satellite: Development of an estimation procedure in the test site of the Mediterranean Italy. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, n. 4, p. 565–576, 2004.
- [2] Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., Huete, A. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). v. 2015, n. June, 2015.
- [3] Waylen, P. et al. Time series analysis of land cover change: Developing statistical tools to determine significance of land cover changes in persistence analyses. *Remote Sensing*, v. 6, n. 5, p. 4473–4497, 2014.
- [4] Simoniello, T.; Lanfredi, M.; Liberti, M.; Copola, R. e Macchiato, M., "Estimation of vegetation cover resilience from satellite time series", *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008.
- [5] Odum, E. P.: *Basic ecology*, Philadelphia: CBS College Publishing, 544 pp., 1983.
- [6] Hott, M.C.; Carvalho, L.M.T.; Antunes, M.A.H; Alves, H.M.R; Rocha, W.S.D., "Estimativa de Expoentes de Hurst para séries temporais de imagens NDVI / MODIS em regiões de pastagens da Zona da Mata de Minas Gerais", *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB*, 2015.
- [7] IEMA - Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Vitória-ES. 2012-2015. Levantamento Aerofotogramétrico, Apoio de Campo, Aerotriangulação, elaboração Ortofotomosaicos, Modelo Digital de Elevação e Mapeamento da Cobertura Vegetal Nativa e do Uso das Terras, em escala igual, ou melhor, a 1/25.000, do Estado do Espírito Santo. Ortofotomosaico (RGB) 2012/2015 Pixel 1x1m, UTM, Datum WGS84, Zona 24s.1:15.000 PEC "A".
- [8] Holben, B. N.: Characteristic of maximum value composite images from temporal AVHRR data, *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1093–1105, 1986.
- [9] Reis, J. A. T.; Caiado, M.A.C.; Barbosa, J. F.; Moscon, M.; Mendonça, A. S. F.; Análise Regional de Vazão Mínima de Referência na Região Centro-Sul do Estado do Espírito Santo. *Revista CIATEC – UPF*, v. 5, n. 2, p. 1-11, 2013.
- [10] GASPARINI, K. A. C. Regionalização de vazões para a bacia do rio Itapemirim. p. 78 f., 2014.