

Geoestatística espaço-temporal aplicada ao albedo de superfície: O caso do sul de Minas Gerais (Brasil)

Henrique José de Paula Alves^{1*}, Luana Mendes dos Santos², Ben Dêvide de Oliveira Batista³

¹Pesquisador, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (*Autor correspondente: henrique.alves@ipea.gov.br)

²Doutoranda em Engenharia Agrícola, Professora substituta da Universidade Federal de Itajubá, Brasil.

³Professor da Universidade Federal de São João del Rei, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 11/07/2021 – Revisado em: 30/07/2021 – Aceito em: 01/09/2021

RESUMO

Diversas áreas da ciência têm dados provenientes caracterizados por variações no espaço e no tempo que são mensuradas utilizando-se procedimentos estatísticos que levam ou não em conta as interações existentes entre as dimensões do espaço e do tempo. Gneiting, em 2002, propôs um modelo que se baseia na construção de funções de covariâncias estacionárias não-separáveis, atendendo à condição de serem positivas definidas, que podem ser utilizadas para modelar a matriz de covariâncias utilizada na krigagem. A mesorregião sul de Minas Gerais é muito importante para o agronegócio brasileiro devido ao plantio da cultivar de café e possui uma extensa área de pastagem, permitindo a criação de bovinos, equinos e suínos e, por isso, é imprescindível o estudo de fatores que impactam o clima dessa região como o albedo da superfície terrestre, que é definido como a capacidade de uma superfície refletir a radiação solar. O objetivo deste artigo foi aplicar o modelo geoestatístico de funções de covariâncias estacionárias não-separáveis proposto por Gneiting, para prever espaço-temporalmente o albedo da superfície terrestre na mesorregião em questão, nos 31 dias do mês de dezembro de 2019. Optou-se por usar o preditor de krigagem linear, pois ele tem a propriedade de ser o melhor preditor linear não enviesado (BLUP). Conclui-se que a família exponencial-cauchy pertencente a classe de funções de covariância apresentada por Gneiting obteve um MSE inferior no ajuste da matriz de covariância do preditor de krigagem linear e, portanto, pode ser usada para prever o albedo da superfície da Terra.

Palavras-Chaves: albedo, espaço-tempo, covariância, Gneiting

Spatio-temporal geostatistical modeling of Gneiting applied to surface albedo (Brazil)

ABSTRACT

Several areas of science have sourced data characterized by variations in space and time that are measured using statistical procedures that take into account or not the existing interactions between the dimensions of space and time. Gneiting, in 2002, proposed a model based on the construction of non-separable stationary covariance functions, given the condition that they are defined positive, which can be used to model the covariance matrix used in kriging. The southern mesoregion of Minas Gerais is very important for Brazilian agribusiness due to the planting of the coffee cultivar and has an extensive pasture area, allowing the creation of cattle, horses and swine and, therefore, it is essential to study the factors that impact the climate of this region as the albedo of the earth's surface, which is defined as the ability of a surface to reflect solar radiation. The objective of this article was to apply the geostatistical model of non-separable stationary covariance functions proposed by Gneiting, to spatially-temporally predict the albedo of the earth's surface in the mesoregion in question, on the 31st day of December 2019. We choose to use the linear kriging predictor as it has the property of being best linear unbiased predictor (BLUP). We conclude that the exponential-cauchy family belonging to the class of covariance functions presented by Gneiting obtained a lower MSE in the adjustment of the covariance matrix of the linear kriging predictor and, therefore, can be used to predict the Earth's surface albedo.

Keywords: Albedo, space-time, covariance, Gneiting

Alves, H. J. P., dos Santos, L. M., Batista, B. D. O. (2021). Geoestatística espaço-temporal aplicada ao albedo de superfície: O caso do sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.9, n.3, p.48-62.



1. Introdução

O albedo da superfície da Terra, definido como a fração global da radiação solar refletida pela superfície da Terra (Gueymard, 1993), é um componente chave na modelagem de vários processos agrônômicos, fisiológicos, biológicos e biogeoquímicos (Yin, 1998; Iziomon e Mayer, 2002; Psiloglou e Kambezidis, 2009; Zhang et al., 2013), e, em geral, por aspectos econômicos e técnicos, é observada em diferentes épocas do ano (Iqbal, 2012). Devido à variação espaço-temporal associada a cada propriedade da superfície da Terra e fatores externos, o albedo da superfície da Terra obtido por medições em locais específicos geralmente não é aplicável a outros locais não monitorados, é habitual usar um valor constante como uma alternativa padrão, sendo 0,20 para uma superfície livre de vegetação e sem neve (Jordan, 1963) e 0,23 para áreas com cobertura de vegetação de alguma cultura hipotética (Allen et al., 1998). No entanto, inúmeras medições terrestres, aéreas e até mesmo de satélite mostraram que o albedo da superfície da Terra sofre grandes variações regionais e latitudinais (Iqbal, 2012; Maghrabi e Al-Mostafa, 2009). Consequentemente, o uso de um valor padrão invariável do albedo da superfície da Terra resulta em grandes incertezas na radiação estimada e, portanto, gera vários outros parâmetros dependentes da radiação, como temperatura da superfície, evaporação e evapotranspiração. Este fato torna a derivação de estimativas oportunas e precisas do albedo da superfície da Terra com variações espaço-temporais cada vez mais importantes em muitos aspectos. Muitos pesquisadores têm se preocupado com isso, como pode ser visto em Zolotokrylin, Brito-Castillo e Titkova (2020); Zhou et al. (2020); Wang et al. (2020); Li, Zhang e Qu (2020); Liao et al. (2020). No entanto, pesquisas voltadas para o Brasil ainda são incipientes e necessárias, dada a importância dos estudos do agronegócio brasileiro.

Como já mencionado, a variação espaço-temporal do albedo da superfície da Terra e a ausência de estimativas precisas impactam substancialmente vários outros parâmetros dependentes de radiação. Nesse sentido, Liao et al. (2020) se preocuparam em caracterizar o albedo da superfície da Terra no interior do Planalto Tibetano (China) por ser uma região que neva muito. Meng (2020) também estudou a variação espaço-temporal do albedo da superfície terrestre em Pequim, China, por se tratar de uma região bastante urbanizada e, consequentemente, com muita refletância da irradiação solar (albedo). Lin et al. (2020) analisou a variabilidade do espaço temporal do albedo da superfície da Terra no Planalto Tibetano, China, entre 2001 e 2019, associando as correlações entre as anomalias existentes no albedo da superfície da Terra e as anomalias de diferentes tipos de vegetação. Zolotokrylin, Brito-Castillo e Titkova (2020) relacionou os efeitos do albedo da superfície da Terra e os valores da temperatura da superfície da Terra em Sonora, México.

Dados que são caracterizados por variações presentes no espaço e no tempo vêm de processos espaço-temporais, e o objetivo da análise estatística para este tipo de dados não é apenas descrever a incerteza sobre as estimativas do atributo de interesse, mas também estimar valores em locais não amostrados. Gneiting (2002) propõe uma classe de funções de covariância estacionárias não separáveis para modelar a matriz espaço-temporal de covariâncias presente no preditor linear de krigagem.

Nesse contexto, aplicou-se a modelagem proposta por Gneiting (2002) em dados de albedo da superfície da Terra na mesorregião sul de Minas Gerais, localizada no Brasil, sendo essa muito rica em produtos oriundos do agronegócio tendo como principais produtos o cultivo de café, milho e soja (Garcia, Mattoso e Duarte, 2006; Reis et al., 2001; Silva, Santos e Lima, 2001; Carvalho et al., 2010; Silva e Maciel, 2010; Rodrigues et al. 2009).

O objetivo deste trabalho é prever o albedo da superfície da Terra nesta mesorregião nos 31 dias de dezembro do ano de 2019 utilizando modelagem geoestatística espaço-temporal. A motivação para o uso do preditor de krigagem linear, é por este ter a propriedade de ser o melhor preditor linear não enviesado (BLUP) (Cressie, 1990), além disso estimativas de albedo de superfície utilizando preditores com menores erros, tem a importância de evidenciar desequilíbrios ambientais (Lima et al., 2021), e contribuir para identificar ilhas de calor urbano devido a áreas com solo exposto como evidenciado por Silva, Loureiro e Sousa (2021).

2. Material e Métodos

2.1 Albedo da superfície terrestre

Segundo Spracklen, Bonn e Carslaw (2008), o albedo da superfície terrestre (A) é a razão entre a radiação refletida pela superfície terrestre ($F_{s\omega\uparrow}$) e a radiação incidente nela ($F_{s\omega\downarrow}$). Sua expressão é dada pela Equação 1:

$$A = \frac{F_{s\omega\uparrow}}{F_{s\omega\downarrow}} \quad (1)$$

Trata-se de uma medida adimensional e, por esse motivo, é expressa em termos de porcentagem com valores entre 0 e 1, não sendo uma propriedade da superfície terrestre, mas uma característica do sistema Terra-atmosfera (Spracklen, Bonn e Carslaw, 2008). É também uma das variáveis mais importantes na superfície da Terra que um afeta o clima da Terra (Dickinson, 1983; Sarafanov et al., 2020).

O valor 0 representa nenhuma reflexão (superfície terrestre negra) e o valor 1 representa a reflexão total (superfície terrestre branca). Ele traz alguns efeitos importantes para o ecossistema, como efeitos na insolação, e efeitos no clima, e efeitos na retroalimentação albedo-temperatura, efeitos na formação de neve, efeitos em pequena escala (sensação de calor e frescor ao usar roupas escuras e claras), efeitos no reflorestamento de árvores (fotossíntese) reduzindo o desmatamento de árvores, e efeitos na água, e efeitos na formação de nuvens (Spracklen, Bonn e Carslaw, 2008).

2.2 O preditor linear de krigagem

Suponha que se amostra n localizações S_1, S_2, \dots, S_n e em cada localização tem-se uma série temporal em T tempos distintos. Então, o conjunto de observações, ou campo aleatório espaço-tempo, $Z(S_i; T_j)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, T$, onde $Z(\cdot)$ é a variável resposta de interesse. O objetivo principal é construir um modelo que possa fazer previsões para localizações não amostradas S_i em um tempo específico T_j .

Considere um campo aleatório espaço-temporal $Z(S_i; T_j)$. A técnica conhecida como krigagem é um método de regressão usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados. Frequentemente, a krigagem é o objetivo final na análise de campos aleatórios, e a validade da previsão é influenciada pela especificação da função de covariância ou modelos teóricos de semivariogramas (Stein, 2012). A estimativa correta dos parâmetros desses modelos também é de suma importância.

Considere $Z(S_0; T_0)$ um valor não observado de algum atributo Z localizado no espaço e no tempo, respectivamente, onde S_0 é a localização espacial e t_0 é a localização no tempo. O preditor linear de krigagem espaço-tempo tem as seguintes propriedades: é não viesado e de variância mínima. Para o caso em que $\mu(S; t)$ é conhecido e constante, temos o preditor conhecido como krigagem ordinária.

2.3 Variância de krigagem ordinária (erro de predição)

A variação da estimativa quantifica o valor do erro ao avaliar $Z(S_0; t_0)$ usando $\hat{Z}(S_0; t_0)$. A variância da krigagem é um caso particular da variância da estimativa, sendo seu menor valor.

Geralmente, a amostragem é feita em um conjunto de pontos distribuídos esparsamente ao longo da área em estudo, e o objetivo é descrever o campo aleatório continuamente em toda a área. No entanto, para prever campos de espaço-tempo aleatórios, obter modelos teóricos de semivariogramas pode ser muito complicado. Uma maneira mais direta é considerar modelos teóricos de funções de covariância estacionárias conforme apresentado por Gneiting (2002).

2.4 Classes de funções de covariâncias de Gneiting

Gneiting (2002) considera duas formas possíveis de modelagem de dados oriundos de uma estrutura espaço-temporal: uma especificação geoestatística e outra baseada em modelos. A especificação geoestatística, que será considerada neste trabalho, geralmente utiliza krigagem, e o vetor de médias é facilmente especificado pelo contexto, o que não ocorre com a matriz de covariância, cujos elementos são dados por uma função de covariância válida na qual é assegurado a condição de ser positiva definida. A modelagem desta raiz de covariância da matriz é o ponto chave deste artigo e, portanto, Gneiting (2002) apresenta um modelo dado pela equação 2:

$$W = \Sigma(\mathbf{h}, u) = \frac{\sigma^2}{(\psi|u|^2)^{d/2}} \phi\left(\frac{\|\mathbf{h}\|^2}{\psi|u|^2}\right), \quad (\mathbf{h}, u) \in \mathbb{R}^d \times \mathbb{R} \quad (2)$$

onde $\|\cdot\|$ é a norma quadrática euclidiana entre duas localizações georreferenciadas no espaço e separadas por uma distância espacial euclidiana $\mathbf{h} = \|\mathbf{S}_i - \mathbf{S}_j\|$, $|u| = |t_i - t_j|$ é a deslocamento no tempo, $|\cdot|$ representa o valor absoluto, σ^2 é a variabilidade do campo aleatório. Especificamente, $\phi(t)$, $t \geq 0$, é qualquer função completamente monótona e $\psi(t)$, $t \geq 0$, é qualquer função positiva com uma derivada completamente monótona. Gneiting (2002) apresenta duas classes de funções que atendem à condição de $\phi(t)$ e $\psi(t)$. Cada modelo de função de covariância é obtido substituindo as combinações possíveis dessas funções no modelo de funções de covariâncias. Algumas dessas combinações geram famílias de modelos conhecidos, como modelos da classe exponencial e da família Whittle-Matérn.

Tabela 1 – Funções completamente monótonas.

Funções ($\phi(t)$)	Parâmetros
e^{-ct^γ}	$c \geq 0, 0 < \gamma \leq 1$
$(2^{v-1}(v))^{-1}(ct^{1/2}K_v(ct^{1/2}))$	$c > 0, v > 0$
$(1 + ct^\gamma)^v$	$c \geq 0, 0 < \gamma \leq 1, v > 0$
$2^v(e^{ct^{1/2}}) + e^{(ct^{1/2})}v$	$c > 0, v > 0$

Fonte: Dos autores (2021)

Tabela 2 – Funções positivas com uma derivada completamente monótona.

Funções ($\psi(t)$)	Parâmetros
e^{-ct^γ}	$a > 0, 0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$
$2^{v-1}(v))^{-1}(ct^{1/2}K_v(ct^{1/2}))$	$a > 0, b > 1, 0 \leq \alpha \leq 1$
$2^v(e^{ct^{1/2}}) + e^{(ct^{1/2})}v$	$a > 0, 0 < b \leq 1, 0 < \alpha \leq 1$

Fonte: Dos autores (2021)

2.5 Área de estudo

Os dados da variável albedo estão localizados na mesorregião sul de Minas Gerais, Brasil, sendo que essa coleta foi realizada por processamento digital de imagens de satélite. Foram utilizadas imagens da série de satélites geoestacionários METEOSAT 9 da Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT).

Este satélite possui instrumentos como o radiômetro GERB (Geostationary Earth Radiation Budget), instrumentos de comunicação como GEOS & R (Geostationary Search and Rescue), plataforma de armazenamento de dados DCS (Data Collection System) e o sensor SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) O sensor Esta SEVIRI está equipado com 12 canais espectrais, variando de comprimentos de onda visíveis a comprimentos de onda infravermelhos distantes, incluindo bandas de absorção de vapor d'água, ozônio e dióxido de carbono, com uma resolução espacial entre 1km a 3km em Nadir (Fensholt et al., 2006).

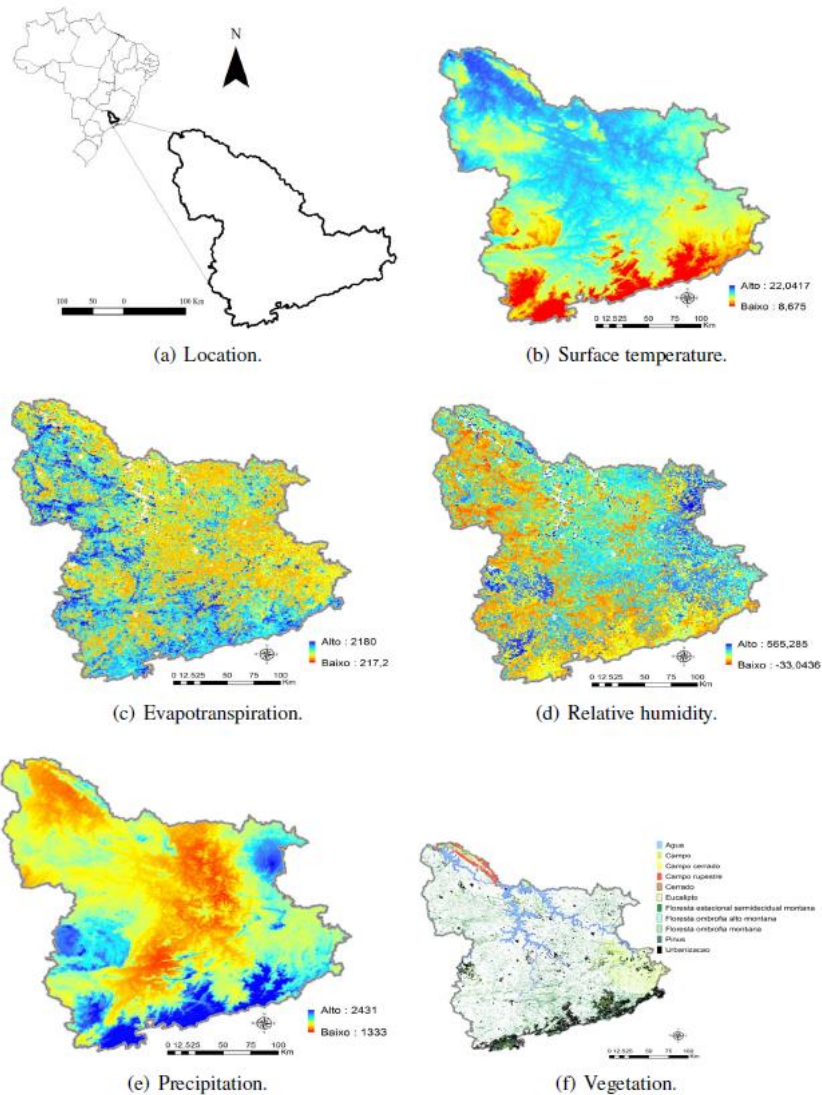
A resolução temporal é capaz de obter imagens meteorológicas a cada 15 minutos no modo nominal ou 5 minutos no modo rápido. Dessa forma, os valores obtidos a cada 15 minutos no METEOSAT-9 podem ser adquiridos 96 vezes ao dia.

Foi considerada a variável albedo da superfície terrestre, coletada em uma média diária de cada um dos 31 dias de dezembro do ano 2019, de forma que as observações para o cálculo do padrão foram obtidas a cada 15 minutos no período entre 08:00h e 17:00h, totalizando 36 observações em cada local. As amostras para análise são dispostas em uma malha com 500 localizações espaciais, sendo as mesmas localizações consideradas em cada dia avaliado.

A região de estudo, trata-se de uma mesorregião com alta concentração de lavouras de café e muitas áreas de pastagem, fornecendo gado, cavalos e suínos. Portanto, é interessante apresentar algumas características dessa mesorregião, como localização, temperatura superficial, evapotranspiração, umidade relativa, precipitação e vegetação.

A Figura 1 mostra essas características da mesorregião sul de Minas Gerais, localizada no Brasil. Observa-se na Figura 1 (b) que se trata de uma mesorregião cuja temperatura é elevada (22 °C) ao norte e, à medida que avança para o sul, a temperatura quedas (8,5 °C) fazendo com que o sul desta mesorregião seja uma área mais fria. Na Figura 1 (c), também nota-se que a evapotranspiração desta mesorregião varia de média (norte e nordeste) a alta (sul e sudeste), com raras exceções para locais com baixa evapotranspiração. O oposto é verdadeiro para a umidade relativa do ar (Figura 1 (d)). As Figuras 1 (e) e 1 (f) mostram a precipitação e vegetação desta mesorregião. Nota-se que os locais de alta precipitação estão concentrados mais ao sul desta mesorregião (Figura 1 (e)), e nota-se que é uma mesorregião com rios, uma alta concentração de florestas, eucaliptos e pinheiros, e a maior concentração de área urbanizada ocorre ao sul desta mesorregião (Figura 1 (f)).

Figura 1 - Caracterização da região sul de Minas Gerais no Brasil: localização, temperatura superficial, evapotranspiração, umidade relativa, precipitação e vegetação.



Fonte: Dos autores (2021)

Em geral, o ajuste dos modelos em qualquer análise estatística só deve ser realizado se as observações coletadas não apresentarem tendência (estacionariedade). O estudo geoestatístico não é diferente. Em seguida, realizou-se o teste de estacionariedade média Kwiatkowski – Phillips – Schmidt – Shin (KPSS) como em KQBL Owski e Welfe (2004) a fim de verificar se os dados de albedo são estacionários (Tabela 3), cuja hipótese nula H_0 implica em estacionariedade dos dados. Assim, acredita-se ter evidências de que os dados são estacionários e, portanto, a utilização do modelo proposto por Gneiting (2002), como na equação 5 é adequada. Com essas informações, ajustou-se o modelo da função de covariância como na seção 2.4.

Tabela 3 – O teste de tendência KPSS. Aqui, a tendência KPSS é o valor da estatística de teste, o valor-p é o valor p associado à estatística de teste e Decisão é a decisão tomada com base no valor p obtido.

Tendência KPSS	Valor-p	Decisão
0,13266	0,07469	Não rejeita H ₀

Fonte: Dos autores (2021)

3.1 O modelo de Gneiting ajustado

Utilizou-se todas as combinações possíveis de funções exibidas por Gneiting (2002) (Tabelas 1 e 2) e escolheu-se a combinação com o menor erro quadrático médio (MSE). O menor MSE (0,000018) foi obtido pela combinação da primeira entrada da Tabela 1 com a segunda entrada da Tabela 2 (família exponencial-cauchy) e, portanto, o modelo considerado é apresentado na equação 3:

$$W = \Sigma(\mathbf{h}, \mathbf{u}) = \frac{\sigma^2}{(a|u|^{2\alpha+1})^{\beta d/2}} \exp\left(-c \frac{\|\mathbf{h}\|^{2\gamma}}{(a|u|^{2\alpha+1})^{\beta\gamma}}\right), \in \mathbb{R}^d \times \mathbb{R} \quad (3)$$

$$C_0(\mathbf{h} = 0, \mathbf{u}) = \frac{\sigma^2}{(a|u|^{2\alpha+1})^{\beta d/2}} \quad (4)$$

O efeito pepita (Equação 4) é obtido considerando $\mathbf{h} = 0$ na equação (3) e é definido como um erro de amostragem incontrolável. As quantidades a e α são os parâmetros de escalonamento e suavidade do processo ao longo do tempo, respectivamente, γ é o parâmetro de suavidade do processo no espaço, β é o parâmetro que mede a força da interação entre espaço e tempo e d é a dimensão do espaço. Considerou-se o espaço bidimensional ($d = 2$) para obter as estimativas dos parâmetros para o modelo apresentado na equação 5. A Tabela 4 apresenta as estimativas dos parâmetros do modelo de Gneiting conforme equação 3.

Tabela 4 – Estimativas dos parâmetros do modelo de função de covariância considerado: σ^2 é a variância do campo aleatório, γ é o parâmetro de suavidade n espaço, α é o parâmetro de suavidade no tempo, c é o parâmetro de escala no espaço, a é o parâmetro escala de tempo, β é o parâmetro que mede a força de interação entre o espaço e o tempo, $C_0(\mathbf{h} = \mathbf{0}, \mathbf{u})$ é o efeito pepita, $d = 2$ é a dimensão do espaço.

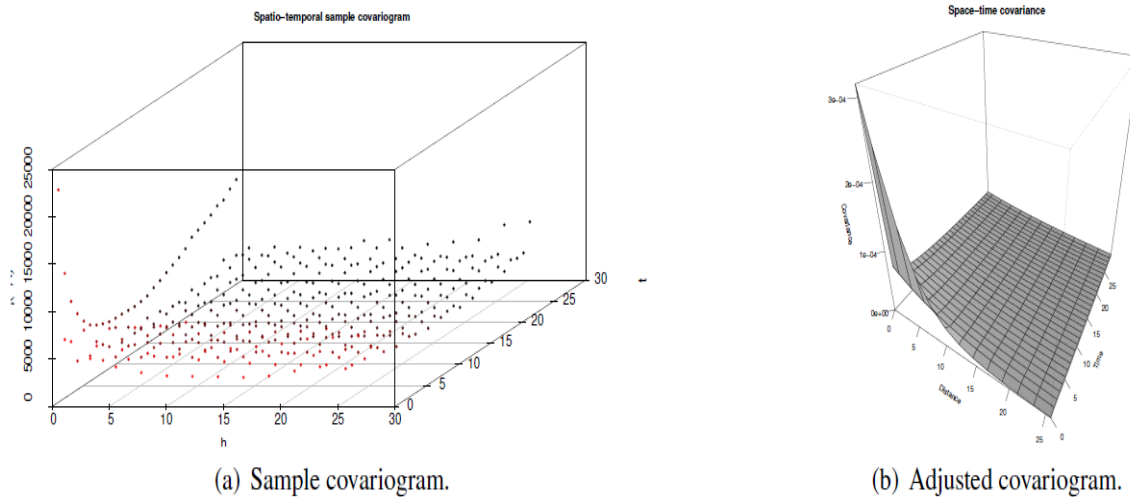
σ^2	γ	α	c	a	β	$C_0(\mathbf{h} = \mathbf{0}, \mathbf{u})$
4.298×10^{-16}	1.03×10^3	3.17×10^2	4.47×10^3	1.79×10^1	1.00×10	3.14×10^{-1}

Então, o modelo ajustado das funções de covariância e efeito pepita, como na equação 3 e na equação 4, é apresentado na seguinte expressão:

$$W = \frac{4.298 \times 10^{-16}}{(1.79 \times 10|u|^{6.34 \times 10^2} + 1)} \exp\left(-4.47 \times 10^3 \frac{\|\mathbf{h}\|^{2.06 \times 10^3}}{(3.17 \times 10^2|u|^{6.34 \times 10^2} + 1)^{3.17 \times 10^2}}\right) \quad (5)$$

$$C_0(\mathbf{h} = 0, \mathbf{u}) = 3.14 \times 10^{-1}. \quad (6)$$

A Figura 2 mostra a amostra e os covariogramas ajustados para o modelo apresentado na seção 2.4.

Figura 2 - Amostra e ajuste do covariograma para o modelo de Gneiting.

Fonte: Dos autores (2021)

Apresenta-se na próxima seção os resultados obtidos, fornecendo os mapas de krigagem de erros de tempo e predição (2.2).

3. Resultados e discussão

3.1 Mapas de krigagem espaço-temporal

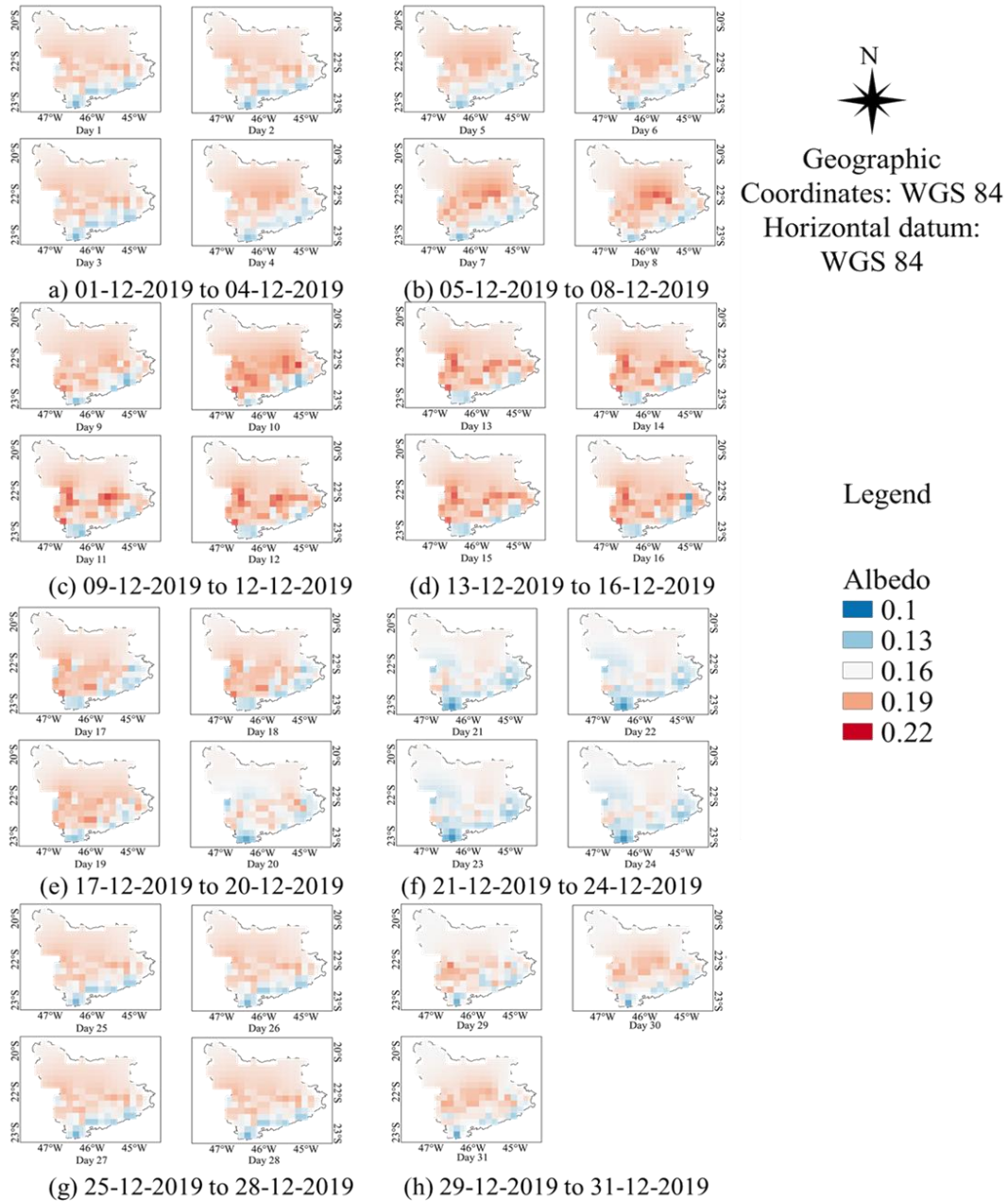
Observa-se na Figura 3 o albedo médio da superfície terrestre sofrendo variações de concentração ao longo dos dias considerados. Nota-se na Figura 3 (a) que a maior concentração média do albedo da superfície terrestre (0,20) está localizada no centro-sul e a sudoeste desta mesorregião. A média encontrada para as áreas de pastejo na Figura 3 (a) foi de 0,16, este valor está em linha com os de Giongo, Padovani e Vettorazzi (2009) de 0,14 a 0,16, e dentro da faixa de albedo superficial apresentado por Campos, Adami e Araújo (2020) de 0,15 a 0,25 em áreas de vegetação rasteira, incluindo pastagens e áreas agrícolas e de acordo com os estudos da Campos, Adami e Araújo (2020) em que o albedo nas áreas de pastagem estava na faixa de 0,145 a 0,156. Para as áreas agrícolas da Figura 3 (a), também foi encontrado um albedo médio de 0,16. Esse resultado mostra pouca variação nos valores quando comparado a outras áreas agrícolas que podem variar de 0,13 a 0,19 (Giongo, Padovani e Vettorazzi, 2009).

No quarto dia (Data 4), a maior concentração de albedo se desloca para a área central desta mesorregião, sendo que nessas áreas de maior concentração de albedo da superfície terrestre estão as áreas de baixa temperatura superficial, exceto o quarto dia (Data 4) que se encontra na área central e cuja temperatura superficial é alto. Além disso, é uma área de maior concentração do albedo da superfície terrestre com baixa evapotranspiração, alta umidade relativa, alta precipitação com exceção de o quarto dia (Data 4), que tem baixa precipitação. Sobre vegetação e área urbanizada, a alta concentração de albedo na superfície terrestre localiza-se em áreas de concentração de floresta, eucalipto e também de pouca urbanização.

Observa-se nas Figuras 3 (b), 3 (c), 3 (d), 3 (e) e 3 (f) que a maior concentração de albedo da superfície da Terra permanece no centro-sul e sudeste da mesorregião sul de Minas Gerais (0,22). No oitavo dia (Data

8), em quase toda a área desta mesorregião, o albedo da superfície terrestre apresentava um valor médio em torno de 0,14. Como os dados foram obtidos por imagem de satélite, é estimado que no dia em questão ocorreu uma alta precipitação e/ou a ocorrência de nuvens em praticamente toda a região em estudo. Nuvens e chuvas fortes atuam como barreira para a obtenção de imagens de satélite (Geiger, 2008).

Figure 3– Mapas de krigagem da média diária do albedo da superfície terrestre nos 31 dias de dezembro do ano 2019.



Fonte: Dos autores (2021)

Especificamente, Ridgwell et al. (2009) sugerem que a infraestrutura global existente está associada à agricultura arável, visto que as plantas cultivadas exercem uma importante influência sobre o balanço energético climático devido às diferenças em seu albedo superficial em relação aos solos e à vegetação natural. Rhland (2019) estudou a decomposição de serapilheira exposta à radiação solar, onde um fator que pode influenciar a radiação solar incidente é o albedo superficial. Os autores examinaram a influência de diferentes albedos superficiais na fotodegradação no sul de Minnesota. Doughty et al. (2011) avaliaram a superfície da Terra para aumentar o albedo e testar se o aumento do albedo agrícola pode resfriar o clima regional.

Ainda assim, Irvine, Ridgwell e Lunt (2011) apresentam resultados de uma série de simulações de modelo de circulação geral atmosfera-oceano (GCM) para comparar três propostas de geoengenharia de albedo de superfície: urbano, agrícola e aumento do albedo no deserto. Liu et al. (2020) quantificam a importância dos efeitos biofísicos do desmatamento por meio de estudos do albedo da superfície da Terra. Lone et al. (2020) avaliou a influência das mudanças climáticas e do albedo da superfície da Terra na vegetação. Este é um parâmetro importante, variando de acordo com as mudanças no uso e cobertura do solo e nas condições e umidade do solo (Oliveira et al., 2015), impactando diretamente no balanço energético e no clima.

Além disso, compreender o comportamento do albedo melhora nossa compreensão da fenologia da vegetação durante as interações terra-atmosfera (Wang et al., 2018). Áreas mais escuras como gramíneas, plantações, tratamento de solo para plantio (mudança de cor), entre outros fatores como a presença de nuvens, são possíveis indicadores do menor albedo da superfície terrestre.

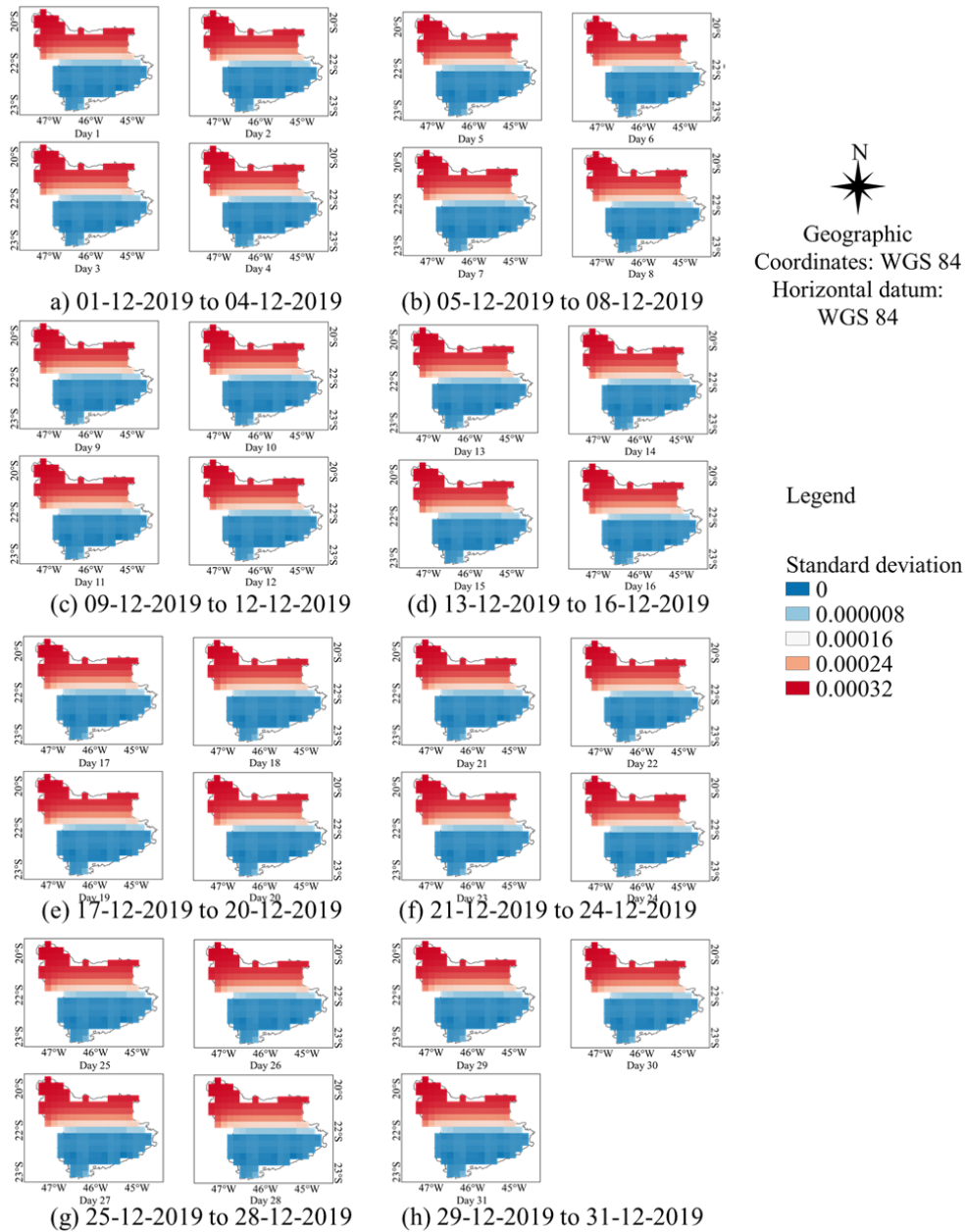
Essa característica ocorre porque quanto menor o albedo, maiores as taxas de evapotranspiração, o que leva à conclusão de que mudanças significativas nos padrões de albedo causadas por mudanças no uso da terra podem alterar os padrões de evaporação e transpiração, como a substituição da vegetação arbórea por áreas agrícolas ou pastagens. Assim, esta mudança impacta diretamente o manejo da irrigação em áreas agrícolas e, portanto, de acordo com a conclusão dos estudos de Campos, Adami e Araújo (2020), a estimativa de albedo é útil para criar estratégias que ofereçam subsídios na implementação de instrumentos de gestão e planejamento agrícola e ambiental frente à expansão das lavouras. De maneira geral, nota-se na Figura 3 que o valor do albedo na mesorregião sul de Minas Gerais se concentra entre 0,10 e 0,22 para os 31 dias de dezembro de 2019.

Recomenda-se estudos futuros sobre as respostas do albedo da região de estudo, analisando os meses do ano para associar às estações do ano e seu comportamento nos diferentes anos para a análise das variações climáticas devidas às mudanças no uso do solo.

3.2 Mapas de variância de krigagem espaço-temporal

A Figura 4 mostra os mapas de variância de krigagem para a variação diária média do albedo da superfície da Terra medido ao longo dos 31 dias de dezembro de 2019.

Figura 4– Mapas de desvio padrão de krigagem da média diária do albedo da superfície terrestre nos 31 dias de dezembro do ano 2019.



Fonte: Dos autores (2021)

Em geral, nota-se que o preditor de krigagem linear usado descreveu o comportamento do albedo da superfície da Terra na mesorregião sul de Minas Gerais de forma satisfatória, com erro de predição de no máximo 0,02. Este resultado evidencia a característica do preditor de krigagem linear ser o melhor preditor

não enviesado, sendo possível obter estimativas do albedo de superfície em toda a área de estudo e principalmente em locais que não foram amostrados com menor erro possível de variância.

Os autores Lima et al. (2021), estudando o comportamento do albedo no município de Petrolina, aplicaram a classificação de imagem de satélite para gerar dados especializados do albedo de superfície, para a análise de exatidão e para aferir o desempenho do classificador utilizado, os autores utilizaram o Índice Kappa, uma medida de 0 a 1 que reverbera o quanto as observações se distanciam das observações esperadas, ressalta-se que os autores obtiveram um índice kappa de 0,61 sendo considerado uma acurácia de classificação muito boa. Neste estudo utilizou-se uma abordagem totalmente diferente e inédita para estimativas de albedo, como são abordagens diferentes não é passível de comparações, entretanto, a figura 4 reverbera que ao desvio padrão de krigagem para a média diária do albedo foi igual para todos os dias estudados além de ser uma variação muito próxima de zero, sendo uma metodologia confiável para a espacialização de variáveis ambientais.

4. Conclusão

Foi possível aplicar a modelagem espaço-temporal usando a geoestatística usando funções de covariância. A proposta considerada neste trabalho mostrou-se útil para modelar o albedo de superfície terrestre observado nos 31 dias de dezembro de 2019 na mesorregião sul de Minas Gerais, localizada no Brasil, devido à obtenção da mínima variância de krigagem, com erros de predição próximos à zero.

Houve variações diárias, sendo possível observar ao longo dos dias estudados estas variações, principalmente devido a precipitação e presença de nuvens. Observou-se que a alta concentração de albedo de superfície da área de estudo, localiza-se em áreas de concentração de floresta, eucalipto e também de pouca urbanização.

5. Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M., (1998). Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, 300, D05109.
- Campos, M. S.; Adami, M.; & Araújo, A. C., (2020). Análise do Albedo de Superfície da Palma de óleo e Diferentes Usos e Coberturas do Solo no Leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 36, 15-21.
- Carvalho, E. R., Rezende, P. M. D., Ogoshi, F. G. A., Botrel, É. P., Alcantara, H. P. D., & Santos, J. P., (2010). Desempenho de cultivares de soja [Glycine max (L.) Merri] em cultivo de verão no sul de minas gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, 34, 892–899.
- Cressie, N., (1990). The origins of kriging. **Mathematical geology**, 22, 239–252.
- Dickinson, R. E., (1983). Land surface processes and climate—surface albedos and energy balance. **Advances in geophysics**. Elsevier, 25, 305–353.
- Doughty, C. E., Field, C. B., McMillan, & A. M., (2011). Can crop albedo be increased through the modification of leaf trichomes, and could this cool regional climate? **Climatic Change**, 104(2), 379–387.
- Fensholt, R., Sandholt, I., Stisen, S., & Tucker, C., (2006). Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor. **Remote Sensing of Environment**, 101, 212–229.

Garcia, J. C., Mattoso, M. J., DUARTE, & J. de O., (2006). Importância do milho em Minas Gerais. **Embrapa Milho e Sorgo - Artigo em periódico indexado (ALICE)**.

Geiger, B., Carrer, D., Franchisteguy, L., Roujean, J.L., & Meurey, C., (2008). Land surface albedo derived on a daily basis from Meteosat Second Generation observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 46(11), 3841–3856.

Giongo, P. R.; Padovani, C. R.; & Vettorazzi, C. A., (2009). Variabilidade espacial e temporal do albedo obtido a partir de imagens MODIS na região do Pantanal. **Anais 14º Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, 14, 4715-4722.

Gneiting, T., (2002). Nonseparable, stationary covariance functions for space–time data. **Journal of the American Statistical Association**, 97, 590–600.

Gueymard, C., (1993). Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. **Solar Energy**, 51, 121–138.

Iqbal, M., (2012). **An introduction to solar radiation**. Elsevier.

Irvine, P. J., Ridgwell, A., & Lunt, D. J., (2011). Climatic effects of surface albedo geoengineering. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 116(D24).

Iziomon, M. G., & Mayer, H (2002). On the variability and modelling of surface albedo and long-wave radiation components. **Agricultural and Forest Meteorology**, 111, 141–152.

Jordan, R., (1963). The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors. **Solar Energy**, 7, 53–74.

Li, X., Zhang, H., & Qu, Y., (2020). Land surface albedo variations in SanJiang plain from 1982 to 2015: Assessing with glass data. **Chinese Geographical Science**, 30(5), 876–888.

Liao, W., Liu, X., Burakowski, E., Wang, D., Wang, L., & Li, D., (2020). Sensitivities and responses of land surface temperature to deforestation-induced biophysical changes in two global earth system models. **Journal of Climate**, 33(19), 8381–8399.

Lima, J. F., de Oliveira, L. M. M., das Montanhas Farias, Á. A., da Silva, B. B., Rodrigues, D. F. B., & Montenegro, S. M. G. L. (2021). Geotecnologia para Caracterização do Albedo e Temperatura da Superfície no Sertão de Pernambuco, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, 44, 1-11.

Lin, X., Wen, J., Liu, Q., You, D., Wu, S., Hao, D., Xiao, Q., Zhang, Z., & Zhang, Z., (2020). Spatiotemporal variability of land surface albedo over the Tibet Plateau from 2001 to 2019. **Remote Sensing**, 12(7), 1188.

Liu, J., Worth, D., Desjardins, R., Haak, D., McConkey, B., & Cerkowski, D., (2020). Influence of two management practices in the Canadian Prairies on radiative forcing. **Science of the Total Environment**, 142701.

- Lone, B.A., Fayaz, A., Manzoor, M., Andrabi, N., Qayoom, S., Dar, Z., Rasool, F., Lone, A., Kumar, S., & Mushatq, N., (2020). An overview of climate change and its impact on crop productivity. **HISTORY**, p.2.
- Maghrabi, A., & Al-Mostafa, Z., (2009). Estimating surface albedo over Saudi Arabia. **Renewable energy**, 34(6), 1607–1610.
- Meng, C., (2020). Surface albedo assimilation and its impact Surface Radiation Budget in Beijing. **Advances in Meteorology**, 2020, 2020.
- Oliveira, B. S., Moraes, E.C., Rudorff, B. F. T., & Mataveli, G. A. V., (2015). Análise do desempenho de modelos de albedo da superfície em áreas de cana-de-açúcar com dados do sensor MODIS/TERRA. **Revista Brasileira de Cartografia**, 67(3).
- Psiloglou, B., Kambezidis, & H., (2009). Estimation of the ground albedo for the Athens area, Greece. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 71(8-9), 943–954.
- Reis, R. P., Reis, A. J. D., Fontes, R. E., Takaki, H. R. C., & Castro Junior, L. G. D., (2001). Custos de produção da cafeicultura no sul de Minas Gerais.
- Ridgwell, A., Singarayer, J. S., Hetherington, A. M., Valdes, P. J., (2009). Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering. **Current Biology**, 19(2), 146–150.
- Rodrigues, F., Von Pinho, R.G., Faria Filho, E.M., & Goulart, J.D.C., (2009). Capacidade de combinação entre linhagens de milho visando à produção de milho verde. **Bragantia**, 68, 75–84.
- Sarafanov, M., Kazakov, E., Nikitin, N.O., & Kalyuzhnaya, A.V., (2020). A machine learning approach for remote sensing data gap-filling with open- source implementation: An example regarding land surface temperature, surface albedo and NDVI. **Remote Sensing**, 12(23), 3865.
- Silva, J. P. S. D., Loureiro, G. E., & Sousa, I.D. (2021). Análise espaço-temporal da temperatura da superfície terrestre na Cidade de Marabá, Pará, Brasil. **Research, Society and Development**, 10(7).
- Silva, E. C.D., & Maciel, G. M., (2010). Fluxo gênico em soja na região do sul de minas gerais. **Bioscience Journal**, 26(4).
- Silva, S. D. M., Santos, A. C. D., & Lima, J. B. D., (2001). Competitividade do agronegócio do café na região sul de Minas Gerais.
- Silva, B. B D.; Lopes, G. M.; & de Azevedo, P.V., (2005). Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 13(2), 11-21.
- Spracklen, D. V., Bonn, B., & Carslaw, K. S., (2008). Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 366(1885), 4613–4626.
- Stein, M.L., (2012). Interpolation of spatial data: some theory for kriging. **Springer Science & Business Media**.

Wang, L., Zhang, D., Chen, C., Hu, F., & Zhang, L., (2020). Impact analysis of surface albedo heterogeneity on shortwave radiation using a 3D radiative transfer model. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 204, 105287.

Wang, Z., Schaaf, C. B., Sun, Q., Shuai, Y., & Román, M.O., (2018). Capturing rapid land surface dynamics with Collection V006 MODIS BRDF/NBAR/Albedo (MCD43) products. **Remote Sensing of Environment**, 207, 50–64.

Yin, X., 1998. The albedo of vegetated land surfaces: Systems Analysis and Mathematical Modeling. **Theoretical and applied climatology**, 60(1), 121–140.

Zhang, Y. F., Wang, X. P., Pan, Y. X., & Hu, R., (2013). Diurnal and seasonal variations of surface albedo in a spring wheat field of arid lands of Northwestern China. **International journal of Biometeorology**, 57(1), 67–73.

Zhou, M., Chen, G., Dong, Z., Xie, B., Gu, S., & Shi, P., (2020). Estimation of surface albedo from meteorological observations across China. **Agricultural and Forest Meteorology**, 281, 107848.

Zolotokrylin, A. N., Brito-Castillo, L., Titkova, T. B., (2020). Local climatically-driven changes of albedo and surface temperatures in the Sonoran Desert. **Journal of Arid Environments**, 178, 104147.