



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS DA TEMPERATURA DE
SUPERFÍCIE NO BIOMA PAMPA UTILIZANDO DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO COM A PLATAFORMA
GOOGLE EARTH ENGINE**

Tiago Maciel de Paula

Relatório de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientado
pelo(a) Dr(a). Igor da Silva
Narvaes.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2024



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DAS TENDÊNCIAS DA TEMPERATURA DE
SUPERFÍCIE NO BIOMA PAMPA UTILIZANDO DADOS DE
SENSORIAMENTO REMOTO COM A PLATAFORMA
GOOGLE EARTH ENGINE**

Tiago Maciel de Paula

Relatório de Iniciação Científica
do programa PIBIC, orientado
pelo(a) Dr(a). Igor da Silva
Narvaes.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2024

RESUMO

A diversidade de espécies e funcionamento de ecossistemas influenciam-se mutuamente, e há múltiplas evidências que muitas mudanças na fenologia, fisiologia e morfologia de espécies de seres terrestres sejam atribuídas a mudanças climáticas globais e regionais. Nesse contexto, esta pesquisa buscou estudar o padrão térmico do bioma Pampa e identificar possíveis tendências na temperatura de superfície terrestre, relacionando-a com a mudança da cobertura da terra na região. Para a realização do estudo, o processamento de imagens da banda LST_Day_1km, do sensor MODIS presente no satélite Aqua, que fornece a temperatura média diurna da superfície com sensoriamento remoto, foi feito com o auxílio da plataforma Google Earth Engine, onde foram coletados dados diários no período de 2003 a 2022. A partir dos dados processados, foi realizada, dentro da plataforma, uma análise das tendências da temperatura da superfície de maneira anual e sazonal, utilizando os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Theil-Sen. Baseado nos dados obtidos, foram criados mapas e gráficos que ajudaram a dinâmica espacial e temporal das tendências. As informações da temperatura da superfície coletadas foram relacionadas com as de cobertura da terra, fornecidas pela plataforma MapBiomas. Dessa forma, foi possível analisar as situações em que houve uma tendência de aumento ou diminuição de temperatura, relacionado com o comportamento anual do uso da terra em cada região do bioma.

Palavras-chave: Temperatura de Superfície Terrestre. Google Earth Engine. Mudanças Climáticas. Bioma Pampa.

LISTA DE FIGURAS

2.1 Localização da área de estudo.....	12
4.1 Comportamento da média diária da temperatura por períodos de cinco anos (Até o dia juliano 97)	15
4.2: Comportamento da média diária da temperatura por períodos de cinco anos (Período dos 365 dias do ano).....	16
4.3 Média da LST por estação no Bioma.....	17
4.4 Gráfico da evolução da cobertura do solo anualmente no período 2003 – 2022.....	19
4.5 Teste de Mann-Kendall do período 2003 - 2022.....	21
4.6 Teste de Theil-Sen do período 2003-2022.....	22
4.7 Teste de Mann-Kendall por estação do ano.....	23
4.8 Teste de Theil-Sen por estação do ano.....	24

SUMÁRIO

1. Introdução.....	6
2. Área de Estudo.....	11
3. Metodologia.....	12
4. Resultados.....	15
4.1 Temperatura da Superfície no Contexto Geral do Bioma.....	15
4.2 Supressão de Vegetação.....	18
4.3 Espacialização dos Resultados.....	20
5. Conclusões.....	25
Referências.....	25

1. Introdução

A diversidade de espécies e funcionamento de ecossistemas influenciam um ao outro reciprocamente, sendo que há múltiplas evidências que fazem com que seja muito provável que muitas mudanças na fenologia, fisiologia e morfologia de espécies continentais sejam atribuídas a mudanças climáticas globais e regionais (IPCC, 2022).

As mudanças climáticas possuem diversas causas, porém desde o século XIX houve um aumento naquelas de influência antropogênica, em que os seres humanos influenciam no clima direta ou indiretamente. As mudanças que afetam os ecossistemas consequentemente impactam os serviços ecossistêmicos de uso das pessoas.

Segundo o sexto relatório de avaliação do IPCC (2022), “as mudanças climáticas se conectam com esses serviços por três ligações: mudanças climáticas – espécies – ecossistemas – serviços ecossistêmicos”. Os serviços oferecidos pelos ecossistemas são de várias magnitudes e tipos, que influenciam na forma de vida de toda a população humana, incluindo o armazenamento de carbono nos ambientes florestais, evitando que esse carbono se concentre na atmosfera, albedo e disponibilidade de água doce, sendo eles de importância indiscutível para a população humana, tornando necessária a observação e avaliação dos serviços e os fatores de risco que podem estar conectados a eles.

Dentre as mudanças climáticas mais importantes no funcionamento dos ecossistemas estão o aumento da temperatura global, tanto do ar quanto da superfície terrestre e de rios e lagos, relacionados às emissões de gases de efeito estufa, incluindo o carbono armazenado na biosfera sendo lançado na atmosfera pelo aumento de queimadas, alta mortalidade das árvores e insetos por parasitas ou pela mudança no ambiente e derretimento do *permafrost* em ambientes polares.

Uma mudança no ambiente pode obrigar uma espécie ou população a se adaptar para sobreviver naquela área, se refugiar em áreas onde não habitava naturalmente, tornando-se invasora ou, se não for possível nenhuma das outras alternativas, ela simplesmente desaparece daquele ecossistema. A relação entre ecossistema e mudanças climáticas é notável, dando início a um ciclo onde a temperatura aumenta, os ecossistemas morrem gerando assim um novo aumento na temperatura.

Com este cenário torna-se evidente que as principais medidas a serem tomadas devem possuir a finalidade de evitar o aumento das temperaturas e da extinção das espécies constituintes dos ecossistemas, tendo em vista que a superfície terrestre deve

estar efetivamente conservada em uma porcentagem de 30 a 50% para manter a biodiversidade e os serviços dos ecossistemas e as mudanças climáticas aumentam a urgência dessa preservação por todos os danos e extinções que podem vir a causar.

Para se tomar medidas específicas objetivadas na redução dos impactos negativos causados pelas mudanças climáticas se faz necessário entender a realidade de cada ambiente a partir de alguns parâmetros relacionados ao clima e os ecossistemas de cada local a ser estudado. A temperatura da superfície terrestre, de sigla LST (do inglês Land Surface Temperature), é um dos parâmetros chave para o entendimento da superfície do planeta no contexto do clima, tanto em escala local quanto em escala global.

Lugares em que a cobertura florestal não diminui ou até mesmo onde a cobertura vegetal aumenta tendem a sofrer menos com o aumento da temperatura da superfície, pois a vegetação possui um papel importante na determinação da LST (Eleftheriou et al., 2018). Esse aumento na cobertura florestal pode ser um fator de mitigação das mudanças climáticas, desde que as novas florestas respeitem o ecossistema original da região. Há casos em que pode ser melhor para um lugar não ter cobertura nenhuma do que abrigar uma espécie exótica que perturba o ecossistema (IPCC, 2022).

A LST refere-se à temperatura do solo, que pode ser medida por estações climáticas em nível de solo que fornecem esse tipo de dado para um determinado ponto. Entretanto, essas estações não podem representar a LST de uma região inteira, sendo necessário muitas estações próximas umas das outras para que o resultado seja mais preciso, tornando a observação das estações insuficiente quando tratamos de grandes áreas, principalmente em lugares afastados das grandes cidades e que não possuem a quantidade necessária de estações para que a interpolação dos dados desempenhe uma precisão satisfatória.

A principal solução para a determinação da LST na cobertura de grandes áreas está na utilização de dados de sensoriamento remoto, que apresentam as informações a partir de dados coletados de forma remota, principalmente com o uso de satélites de observação, existindo uma grande quantidade de sensores diferentes de satélites variados que podem ser utilizados com essa finalidade (Phan e Kappas, 2018).

Como existem uma grande quantidade e variedade de sensores, é necessário definir qual deles é o mais adequado para cada tipo de estudo e área a ser estudada. A situação ideal é um sensor que tenha boas resoluções espacial e temporal, ou seja, informa dados com uma grande quantidade de detalhes, com tamanho de pixel de poucos metros, com uma consistência temporal alta. Infelizmente, os sensores disponíveis de forma gratuita

não oferecem esse tipo de detalhamento e na maioria das vezes o usuário precisa sacrificar uma resolução para o desenvolvimento da outra.

Dentre os sensores gratuitos que podem ser utilizados para a finalidade de análise da temperatura da superfície destacam-se o Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), presente nos satélites Aqua e Terra e o Thermal Infrared Sensor (TIRS), que faz parte dos satélites do programa Landsat.

O MODIS possui em seus produtos uma resolução temporal de 1 dia, informando os dados diariamente em uma resolução espacial de 1km, o que torna difícil a utilização do mesmo em áreas muito pequenas, como cidades, por exemplo.

Por outro lado, o TIRS tem resolução espacial muito melhor, de 30 metros, mas com uma resolução temporal de 16 dias, levando a uma carência na consistência desses dados dificultando o uso em análises mais precisas, como observar o comportamento de um mês em específico e ainda na ocorrência de algum erro na obtenção o intervalo entre as informações será ainda maior, agravando o problema.

O sensor MODIS é o mais utilizado para a realização de pesquisas científicas que utilizam o LST, principalmente pela excelente resolução temporal. Para a análise de grandes áreas, como países, estados ou biomas, a resolução de 1km oferecida pelo MODIS não é um grande problema, ainda que existam métodos de redução de escala que melhoram a visualização e o detalhamento destes dados (Ebrahimi et al., 2021).

Uma utilização importante dos dados da LST é na análise de tendências da temperatura da superfície em séries temporais, pois explorar o padrão e a tendência espaço-temporal é essencial para a tomada de decisão sobre o gerenciamento sustentável.

A partir da análise dos dados é possível a realização de métodos estatísticos para definir as tendências dos dados observados. Nesse sentido, para calcular a significância das tendências, o teste não-paramétrico de Mann-Kendall é uma forma muito útil de se determinar tendências negativas e positivas de uma série temporal (Mann, 1945; Kendall, 1967). O teste de Theil-Sen (Sen, 1968; Theil, 1992) também se alia a essa análise de dados, fornecendo o nível de significância dessas tendências, determinando se aquela tendência pode ou não ser considerada significativa (Bera et al., 2022).

Os dados de sensoriamento remoto podem ser obtidos de diversas formas, entretanto uma que se destaca pela praticidade e velocidade de processamento de informações é a plataforma online Google Earth Engine, que utiliza linhas de comando baseadas em JavaScript, podendo também ser programada na linguagem Python e

destacando-se por seu processamento em nuvem, dispensando o uso de máquinas potentes, exigidas em programas de computadores tradicionais (Ebrahimy et al., 2021).

No Google Earth Engine (GEE), as bases de dados dos principais sensores e satélites estão disponíveis gratuitamente de maneira simples e rápida, necessitando apenas estar logado em uma conta da empresa. Qualquer que seja a aplicação com os dados de sensoriamento remoto, o GEE pode ser uma solução válida, isto inclui as análises de temperatura de superfície utilizando os sensores TIRS, MODIS, ou mesmo AVHRR e ASTER. Ademais, o GEE permite diversos tipos de operações e funcionalidades, sendo uma ótima ferramenta para o processamento de informações geográficas (Gorelick et al., 2017).

O Brasil é um país que possui uma grande biodiversidade e uma grande quantidade de ecossistemas, com os grandes biomas Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal. No sul do país, está localizado o bioma Pampa, que faz parte também da Argentina e do Uruguai, mas que em sua parte brasileira está totalmente localizado no estado do Rio Grande do Sul, ocupando uma área de 176,5 mil km², o que representa 63% do estado. O bioma se caracteriza predominantemente por uma paisagem campestre, com vegetação rasteira e árvores escassas, apresentando uma rica variedade de espécies. Essa região constitui um dos ambientes mais alterados e ameaçados do país, com uma grande incidência de atividades antrópicas, principalmente com relação ao uso de seu solo, onde as áreas campestres de vegetação nativa estão foram sendo suprimidas para o uso agrícola e de monocultura de árvores exóticas em uma ordem de 1000 km² por ano (Trindade et al., 2021).

Dessa forma o bioma Pampa é uma região em que é imprescindível a observação e a análise do funcionamento ligado às mudanças climáticas, pois a alta taxa de supressão de vegetação nativa do bioma leva a extinção não só de espécies vegetais como as espécies de animais que habitam o bioma, levando a um desequilíbrio no ecossistema que pode levar a grandes impactos, não somente no clima local quanto no clima global.

Os diferentes tipos de cobertura de terra no Pampa se dividem em áreas com superfícies distintas, principalmente representadas pelas áreas de cultivo, áreas de vegetação campestre nativa, áreas de aglomerados urbanos e áreas de vegetação arbórea. Cada uma dessas superfícies se comporta de maneira diferente na dinâmica da LST (Patel et al., 2024), sendo que a mudança de uma cobertura de superfície para outra também altera o comportamento da temperatura dessa superfície.

Para levar em consideração o fenômeno da variação abrupta causada pela alteração da cobertura da superfície, a observação de uma série temporal das destas temperaturas da superfície nesse bioma pode levar a uma compreensão melhor das dinâmicas do funcionamento da temperatura no contexto das mudanças climáticas.

As coberturas também possuem uma dinâmica de ciclo diferente ao longo do ano. As áreas de cultivo possuem temperaturas mais elevadas que as de vegetação campestre nos meses de agosto a dezembro, mas apresentam temperaturas inferiores a estas no mês de fevereiro. Isso se dá pela dinâmica do ciclo fenológico que afeta principalmente as áreas de cultivo, que passam por cobertura vegetal completa e épocas com solo exposto. (Peixoto et al., 2022).

A dinâmica imposta principalmente pelo calendário agrícola torna evidente que a análise não deve se limitar apenas a uma série temporal que interpreta os dados de maneira anual, mas também com a comparação dos dados sazonais, observando como a temperatura se comporta no bioma nas diferentes estações do ano. As tendências sazonais no período de observação também podem ser um indicativo das mudanças climáticas ocorridas, com cada estação podendo se comportar de maneira distinta, apresentando tendências variadas (Eleftheriou et al., 2018).

Dada a extensão territorial do bioma Pampa, é possível realizar uma análise da temperatura da superfície deste bioma utilizando os dados fornecidos pelo sensor MODIS (Wan et al., 2021), obtendo uma boa quantidade de pixels. Dos produtos MODIS existentes, duas bandas fornecem a LST, sendo elas *LST_Day_1km* e *LST_Night_1km*. A primeira informa a temperatura de cada pixel diariamente no período do dia e a segunda entrega o mesmo tipo de dado, porém a informação é do período noturno. Os dados são obtidos diariamente em um horário razoavelmente constante. Para a análise das temperaturas diárias do período diurno no bioma Pampa, o uso da *LST_Day_1km* do sensor MODIS é uma das melhores opções disponíveis para uso em sensoriamento remoto.

A forma mais simples e rápida para a obtenção desses dados é com o uso da plataforma Google Earth Engine, pois o processamento de uma série temporal envolve centenas de imagens e a obtenção de forma manual dessas imagens seria inviável. Com o GEE é possível escolher os dados desejados, o período desejado, a visualização das imagens na forma de mapas e gráficos, além da possibilidade de exportação de todos os dados.

Dessa forma, os objetivos tratados por esta pesquisa consistiram em identificar as tendências das médias de variação da LST no bioma Pampa e relacionar o padrão térmico histórico da LST com a taxa de supressão de vegetação nativa do bioma.

2. Área de Estudo

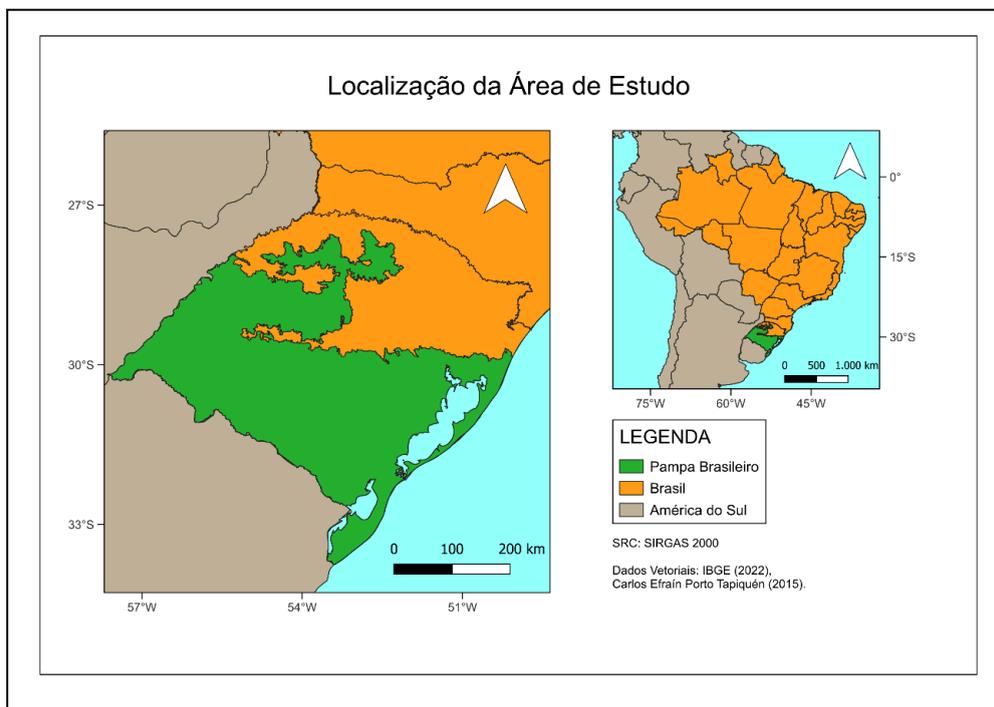
A área de estudo para esta pesquisa foi o bioma Pampa brasileiro (Figura 1), que é exclusivo do Rio Grande do Sul e ocupa 63% do território estadual, em uma área de 17,65 milhões de hectares (IBGE, 2004).

O bioma pampa é caracterizado como predominantemente campestre, com vegetação arbórea esparsa e principalmente concentrada em margens de corpos d'água. O clima da região é definido como Cfa, segundo a classificação climática de Köppen (1948), com verão quente, clima temperado e chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

Esse bioma é considerado um dos biomas mais alterados do país, com um alto nível de supressão da vegetação nativa, sendo uma das principais causas dessa mudança a conversão de áreas campestres nativas em áreas de cultivo, principalmente com a finalidade do cultivo do arroz irrigado e da soja. Na região central do bioma, localizada geomorfologicamente no Escudo Sul-Riograndense, as atividades de silvicultura se fazem presentes, destacando-se o município de Encruzilhada do Sul para esta atividade (SPGG, 2021).

O bioma pampa abriga muitas espécies, endêmicas ou não, de plantas e animais nativos, e com a crescente redução dos espaços naturais representando uma ameaça à existência dessas espécies.

Figura 2.1: Localização da área de estudo



Fonte: Produção do autor

3. Metodologia

Os dados de temperatura da superfície são provenientes do produto MODIS MYD11A2, banda LST_Day_1km do satélite Aqua, que corresponde ao valor da temperatura da superfície terrestre no período diurno, tipicamente entre as 13:00 e as 14:00 horas, representando um valor próximo da máxima diária. Para esse produto em específico, cada valor de pixel é calculado pela média simples dos dados do produto diário correspondente MYD11A1 coletados dentro do período de 8 dias, minimizando a ocorrência de erros e dados perdidos. Esses dados foram obtidos utilizando a API de processamento em nuvem Google Earth Engine (GEE), disponível gratuitamente para uso não comercial.

As informações de EVI/NDVI também foram obtidas da mesma forma, com o produto MODIS MYD13A2. , As informações desendo que ambos os produtos respeitaram o período de análise de 2003 a 2022. Também foram obtidos dados de desmatamento e uso do solo, oriundos das plataformas TerraBrasilis e MapBiomas, respectivamente. É importante salientar que esses dados representam uma aproximação da realidade e nem sempre representam a verdadeira condição de um ambiente em específico.

Esses dados são obtidos nos websites específicos de cada projeto, sendo fornecidos de maneira anual para o período desejado.

Para complementar a análise, algumas imagens dos sensores Landsat/OLI e Sentinel-2 também foram obtidas com o auxílio do Google Earth Engine para a melhor visualização da situação espacial.

Inicialmente o arquivo vetorial da delimitação da área de estudo foi criado a partir dos dados disponíveis na plataforma online do IBGE. A base foi o vetor, em formato Shapefile, “Biomassas do Brasil 1:250 000”, que delimita todos os biomas do país na escala 1:250 000. Foi selecionada apenas a superfície terrestre do Bioma Pampa, tendo sido descontado as áreas da Lagoa Mirim e Lagoa dos Patos, grandes massas de água que estão dentro da delimitação do bioma.

Para as etapas de obtenção dos dados, foi utilizado o editor de código presente na plataforma online Google Earth Engine (Gorelick et al, 2017), disponível gratuitamente em <https://code.earthengine.google.com/>. A primeira etapa é adicionar a camada vetorial do bioma na plataforma, utilizando o upload de *assets*. Os dados de temperatura da superfície da coleção de imagens MODIS MYD11A2 foram obtidos em graus Celsius, utilizando a linha de comando:

```
var LSTc = modis.map(function(img){  
  return img  
  .multiply (0.02)  
  .subtract (273.15)  
  .copyProperties(img, ['system:time_start']);  
});
```

onde o valor fornecido pelo MODIS sofre o fator de correção 0.02, conforme indicado no manual do produto, gerando o valor em kelvin. Para a conversão de Kelvin para grau Celsius, o valor obtido é subtraído por 273,15, onde **273,15 K = 0°C**.

O conjunto de dados foi criado para o período que foi do início de 2003 até o final de 2022, totalizando vinte anos. Esses dados foram transformados em um gráfico, recortando os dados da LST para o Bioma pampa apenas no período selecionado. Para o funcionamento adequado dessa função foi aplicado o cálculo da média para cada imagem. Esse gráfico teve o eixo X correspondendo às datas de interesse e o eixo Y as temperaturas, em °C da LST média do bioma Pampa brasileiro.

Os dados diários da LST podem ser baixados diretamente da plataforma para a análise posterior no formato .csv (valores separados por vírgula). Os Estes dados diários do LST 8day são analisados no software Microsoft Excel, onde as datas foram convertidas para o formato de dia Juliano, onde cada dia do ano possui um número individual, indo de 1 a 365 em anos típicos e 1 a 366 em anos bissextos, para melhor entendimento e visualização dos dados.

A partir desses dados foram gerados gráficos de análises diárias, para o entendimento de como a temperatura da superfície terrestre se comportou durante os anos do período. Ademais, foram gerados os gráficos sazonais, que demonstraram como foi o comportamento da temperatura com relação às estações do ano na região (Verão, Outono, Inverno e Primavera).

Tendo obtido os dados de LST, a próxima etapa consistiu em obter os dados referentes à supressão de vegetação no Bioma Pampa no mesmo período estudado (2003 a 2022). A plataforma TerraBrasilis, desenvolvida pelo INPE, fornece os dados de supressão da vegetação nativa anual no bioma desde o ano de 2000. Esses dados foram baixados no formato .csv para a posterior análise, bem como os dados da cobertura da terra no bioma pampa, disponíveis na plataforma MapBiomas, utilizando-se da plataforma disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>.

Como as informações disponíveis a respeito da supressão de vegetação e cobertura do solo são apenas anuais, não foi possível a tabulação dos dados da mesma forma que os dados de LST, sendo utilizados apenas o dado anual para a análise posterior com os demais dados.

Além dos dados de temperatura da superfície e vegetação, também foram obtidos os índices de vegetação disponíveis fornecidos pelo satélite Aqua, com o produto MODIS MYD13A2, que fornece os índices de vegetação pelas bandas NDVI e EVI em intervalos de 16 dias, com o mesmo intervalo de datas do produto MYD11A2, portanto para esses dados também foram coletadas as informações de 2003 a 2022.

Todos os dados de cobertura da terra, supressão e índices de vegetação também foram analisados no Microsoft Excel, com a posterior comparação entre esses dados e aqueles com os da LST, tanto com os dados anuais quanto os sazonais para encontrar possíveis padrões e causas no comportamento da temperatura da superfície no Bioma.

O próximo passo da pesquisa foi a análise das tendências utilizando os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e Theil-Sen, com o objetivo de verificar o nível de

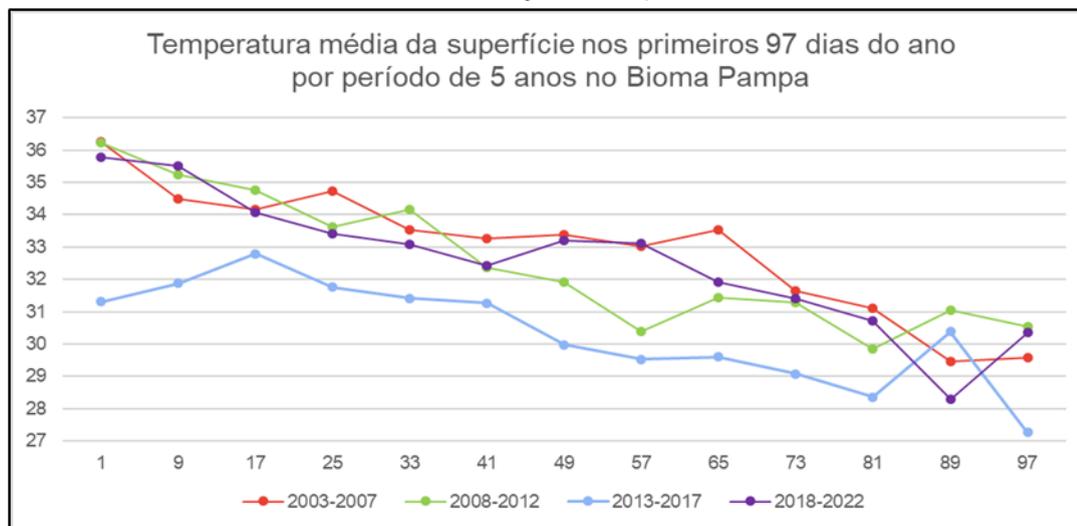
significância das tendências observadas. Esses testes foram realizados dentro da plataforma Google Earth Engine (Zhao et al., 2022). Os testes de Mann-Kendall e Theil-Sen são importantes para determinar qual a relevância dos dados em uma série temporal, definindo se os dados podem ser considerados válidos ou não. Para essa pesquisa, a significância considerada foi de $p < 0,05$.

4. Resultados

4.1 Temperatura da Superfície no Contexto Geral do Bioma

Quando a temperatura da superfície é observada por períodos de cinco anos, a média pouco varia entre os períodos, ficando em $27,9^{\circ}\text{C}$ no primeiro período, $27,7^{\circ}\text{C}$ no segundo, $26,9^{\circ}\text{C}$ no terceiro e $28,1^{\circ}\text{C}$ no último período. Observando o gráfico diário, a maior discrepância existente são os primeiros 97 dias do ano, de janeiro ao início de abril dos anos pertencentes ao terceiro período (Figura 4.1).

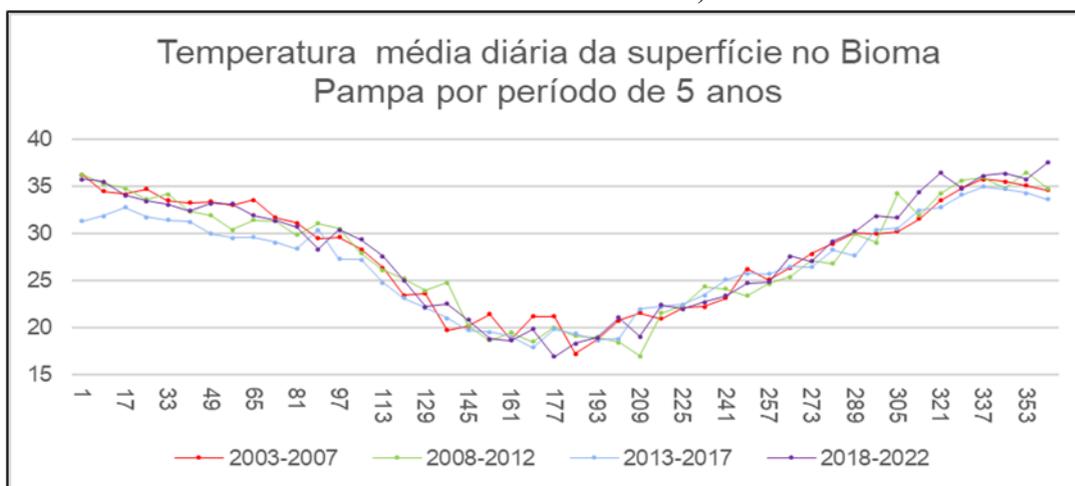
Figura 4.1. Comportamento da média diária da temperatura por períodos de cinco anos (Até o dia juliano 97)



Fonte: Produção do autor

De maneira objetiva, os anos entre 2013 e 2017 formam uma sequência de cinco anos consecutivos em que o início de ano de temperaturas da superfície não chegaram a média de 32°C (Figura 4.2). Nos demais períodos, os anos se intercalaram de maneira mais aleatória, com verões de LSTs mais altas e baixas.

Figura 4.2. Comportamento da média diária da temperatura por períodos de cinco anos (Período dos 365 dias do ano).



Comparando as médias das temperaturas de superfície por quinquênios no verão temos: 33,87°C para o primeiro período, 33,29°C para o segundo período, 31,11°C para o terceiro e 33,77°C para o último período. constata-se Isso significa que a média da LST durante o verão do período de 2013 até 2017 foi mais de 2°C mais baixa comparada aos outros períodos. Nas demais estações, essa situação ainda é perceptível, embora as diferenças entre as LST sejam inferiores (conforme a Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Média da temperatura sazonal por períodos de 5 anos.

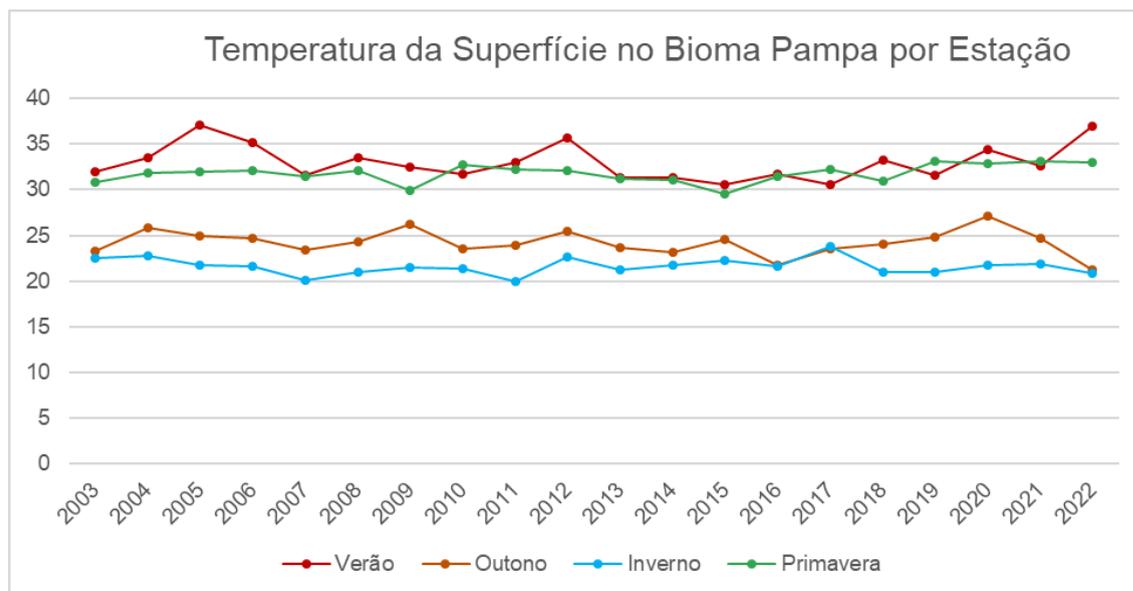
Período	Anos	Verão(°C)	Outono(°C)	Inverno(°C)	Primavera(°C)
1	2003-2007	33,87	24,43	21,75	31,64
2	2008-2012	33,29	24,70	21,28	31,79
3	2013-2017	31,11	23,38	22,13	31,09
4	2018-2022	33,77	24,37	21,31	32,61

Fonte: Produção do autor

O período 3 teve a menor LST no verão, no outono e na primavera. Durante o inverno a situação se inverteu e este foi o período que apresentou a maior temperatura de superfície.

A LST média anual está indicada pela tabela 3.2. Os valores variam entre 26,5°C e 29°C, sendo o menor valor observado no ano de 2016 e o maior em 2020. Ademais, a figura 3.3 indica o gráfico da média da LST em cada estação do ano

Figura 4.3. Média da LST por estação no Bioma



Fonte: Produção do autor

Tabela 4.2-LST média por ano no Bioma Pampa.

Anos	LST Média Anual (°C)
2003	27,13
2004	28,50
2005	28,91
2006	28,42
2007	26,67
2008	27,75
2009	27,53
2010	27,39
2011	27,30
2012	28,96
2013	26,88
2014	26,84
2015	26,77
2016	26,66
2017	27,54
2018	27,34
2019	27,69
2020	29,07
2021	28,10
2022	28,11

Fonte: Produção do autor

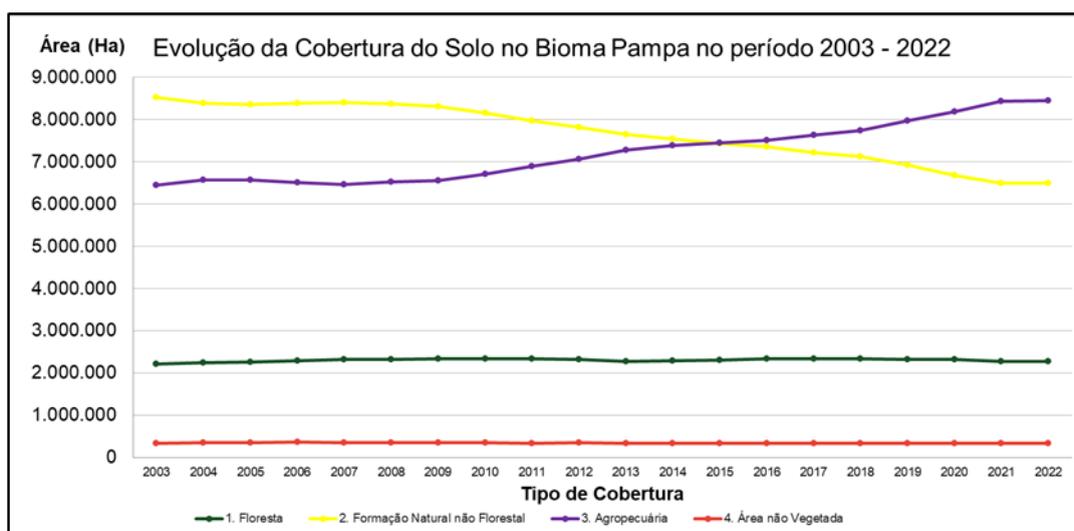
4.2 Supressão de Vegetação

A supressão da vegetação nativo do período de 2003 a 2022 foi de 2,8 milhões de hectares, segundo o INPE (Assis, et al, 2019)), sendo que a maior parte dessa supressão de vegetação nativa se dá na conversão de áreas de vegetação campestre nativa. Em áreas de cultivo agrícola, pois a mudança de uma uso para a outra foi num nível superior a 2 milhões de hectares.

A evolução da cobertura do solo para o período de análise mostra uma tendência de diminuição contínua segundo os dados de monitoramento contínuo do MapBiomias mostra que as áreas campestres nativas representavam 8,5 milhões de hectares em 2003 e

6,5 milhões em 2022. Em contrapartida, as áreas destinadas à agricultura (agropecuária) eram 6,4 milhões em 2003 e 8,4 milhões de hectares no ano de 2022, tendência inversa as áreas de agricultura o que comprova que a supressão da vegetação nativa é convertida em sua totalidade para áreas agrícolas na magnitude de 2 milhões de hectares em um período de 20 anos. A figura 4.4 mostra o gráfico da evolução da cobertura do solo desde 2003, segundo dados do MapBiomias.

Figura 4.4. Gráfico da evolução da cobertura do solo anualmente no período 2003 – 2022.



Fonte: Produção do autor

Grande parte dessas áreas agricultáveis são destinadas ao plantio de soja, que cresceu quatro vezes no período na região, além do arroz irrigado, cultura em que o Rio Grande do Sul representa 71% da produção total do Brasil. As áreas agrícolas representam aproximadamente 50% da extensão total do bioma, constituindo um fator importante para a definição da temperatura da superfície. Na região do bioma, o plantio da soja se dá entre outubro e o início de janeiro e a colheita entre fevereiro e maio.

O calendário agrícola gera épocas em que o solo está predominantemente exposto, gerando temperaturas mais altas na superfície e períodos de predominância vegetal, o que diminui a temperatura de superfície.

Com relação a taxa direta de supressão da vegetação nativa relacionada a temperatura, os resultados foram pouco relevantes, com a correlação da área total desmatada de 0,240681257. Para os dados sazonais, o Verão apresentou correlação de 0,334173162, o outono de 0,159077769, o inverno de 0,253534637 e para a primavera a correlação foi negativa, de -0,305971207. Todos os dados são referentes a supressão da

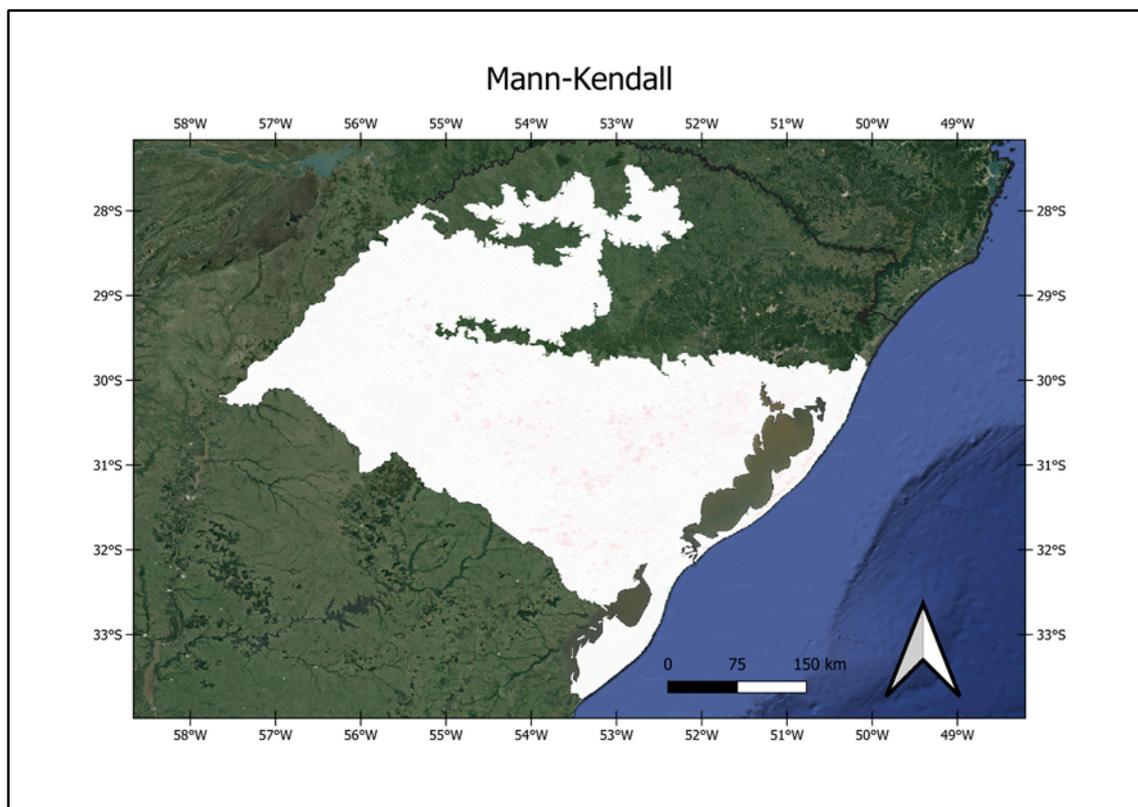
vegetação nativa informada no ano anterior, visto que esta supressão no ano corrente teve um impacto ainda menor na temperatura observada.

Os índices de vegetação têm correlação significativa principalmente na temperatura da superfície no verão, representando um valor r^2 de 0,9048 para o EVI e 0,9211 para o NDVI. No restante do ano, essa correlação é menos significativa, sendo que o valor r^2 da correlação entre NDVI e LST é de 0,4306 na primavera e 0,2912 no outono. Os valores do inverno não apresentaram correlação, com o valor r^2 para a correlação NDVI e LST ficando em 0,0068 neste período. As altas temperaturas estão correlacionadas com índices de vegetação muito mais baixos durante o período do verão, como é observado nos valores de NDVI de 2005, 2012 e 2022.

4.3 Espacialização dos Resultados

A análise dos dados MODIS dentro do GEE levaram a mapas que indicam espacialmente os locais onde se encontram as tendências de temperatura. O teste de Mann-Kendall (Figura 4.5) representa as regiões onde houve alguma tendência. Como foi utilizado a significância de $p < 0,05$, a cor branca representa que não houve tendências, o vermelho representa uma tendência negativa, ou seja, a temperatura diminuiu na média dos últimos 20 anos e o verde representa a tendência positiva. O teste de Theil-Sen por sua vez indica onde a tendência foi significativa ou não, onde o vermelho mostra as áreas em que a tendência não teve significância e o verde indica que houve significância (Figura 3.6).

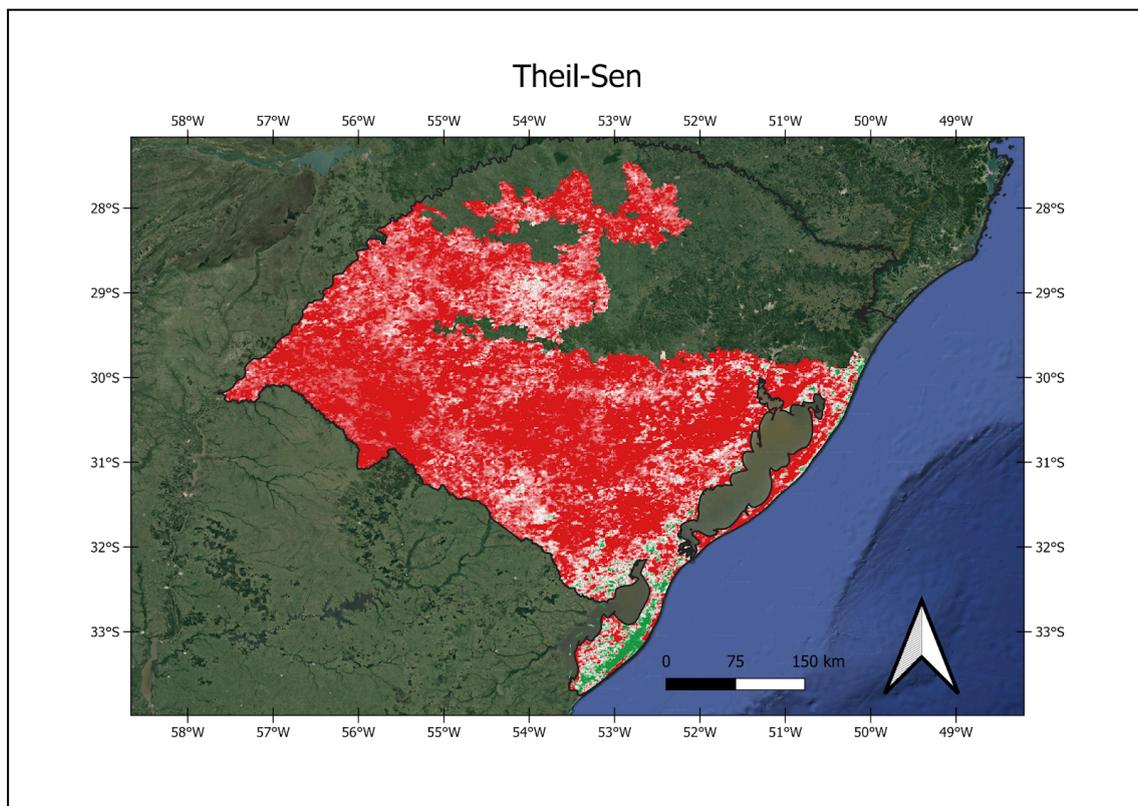
Figura 4.5. Teste de Mann-Kendall do período 2003 - 2022



Fonte: Produção do autor

Durante o período observado, os resultados obtidos por estes testes são pouco expressivos e não indicam grandes tendências significativas para a LST como um todo durante o período observado. O teste de Mann-Kendall, que indica se a tendência foi positiva ou negativa apresentou resultados próximos de zero, o que indicaria que a LST se manteve constante nesses 20 anos no período anual. Da mesma forma, o teste de Theil-Sen apresenta pouca ou nenhuma significância da tendência.

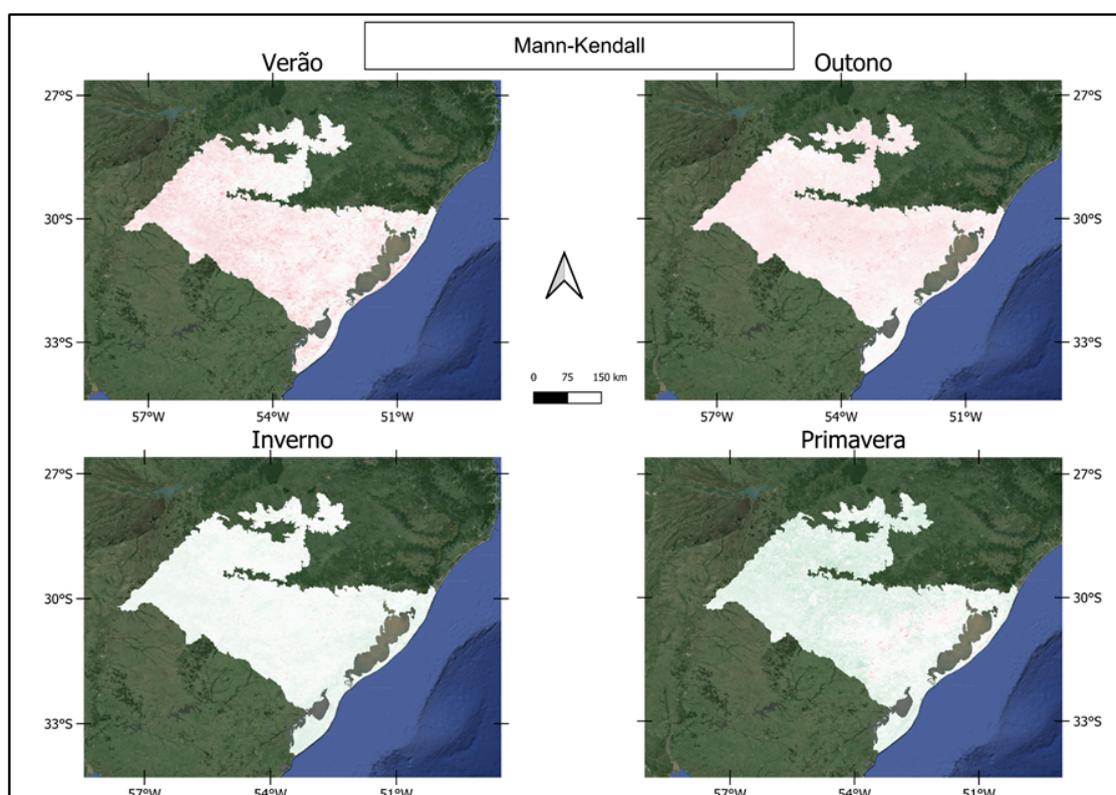
Figura 4.6. Teste de Theil-Sen do período 2003-2022



Fonte: Produção do autor

Além da tendência geral da LST no bioma, também foram aplicados testes sazonais a fim de observar como se comportaram as temperaturas dentro de cada estação. Portanto, a próxima análise mostrou os testes de Mann-Kendall e Theil-Sen por estação do ano. O primeiro teste apresenta a tendência de diminuição da temperatura nas estações de verão e outono e aumento da LST na primavera e no inverno (Figura 4.7).

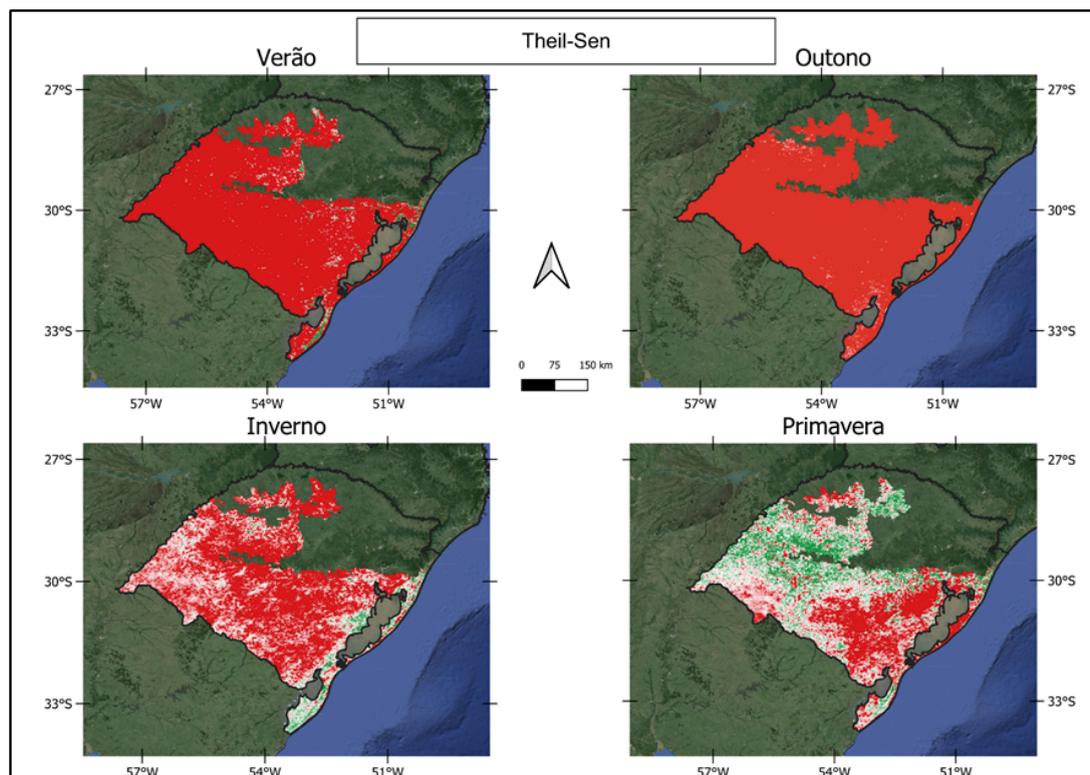
Figura 4.7. Teste de Mann-Kendall por estação do ano.



Fonte: Produção do autor

Já os testes de Theil-Sen foram não-significativos na totalidade da área do bioma Pampa no outono e verão. No inverno a significância ficou restrita a algumas regiões, com destaque à parte litorânea do bioma, indicando uma mudança da temperatura da superfície no inverno desta região que, aliado com o teste de Mann-Kendall, representa um aumento da LST do litoral do bioma Pampa no inverno (Figura 4.8)

. Figura 4.8. Teste de Theil-Sen por estação do ano.



Fonte: Produção do autor

Os testes de Theil-Sen e Mann-Kendall apresentam resultados interessantes na primavera, onde as regiões mais localizadas a oeste apresentam evidente aumento da temperatura da superfície no período de 2003 a 2022, como pode ser observado na área em verde na figura 8. Essa região se destaca por ser a maior produtora de soja do estado (Costa et al., 2022) e, segundo o calendário agrícola (MAPA, 2023), o período da primavera coincide com o período anterior ao plantio e início deste, o que gera uma situação de solo exposto que contribui no aumento da temperatura, já que a LST possui uma correlação negativa com os índices de vegetação (Peixoto et. al., 2022), portanto, quanto menor a vegetação disponível, maior será a temperatura.

Os testes aplicados no GEE vão de encontro ao que foi observado nas médias de temperatura das estações, onde apenas a primavera mostrou aparente aumento na temperatura.

5. Conclusões

A partir de análises construídas na plataforma em nuvem Google Earth Engine, a temperatura da superfície do bioma apresenta uma tendência significativa, principalmente na primavera nas áreas onde o cultivo da soja é mais presente. Essa relação pode estar relacionada com o fato que o solo das regiões do plantio de soja está exposto, sem qualquer cobertura vegetal, pois está em preparação para a época de plantio e desenvolvimento que ocorre no período do verão. Isso não ocorre nas áreas de silvicultura, onde o solo continua com uma grande cobertura vegetal.

As demais estações não apresentaram grandes tendências, nem positivas nem negativas. O inverno é a estação em que a vegetação tem menor influência na temperatura da superfície. O verão e o outono não apresentaram nenhuma tendência na temperatura da superfície, sendo as estações em que as áreas agricultáveis de arroz e soja estão em plantio, com grande cobertura vegetal.

O estudo mostrou que as tendências da temperatura da superfície tem relação com o uso do solo pela agricultura, mas esse não é o único fator que influencia nesse parâmetro. Outros fatores, como precipitação, tipo de solo, umidade e temperatura do ar também podem interferir na dinâmica da temperatura da superfície nesse bioma.

Referências

Assis, L. F. F. G.; Ferreira, K. R.; Vinhas, L.; Maurano, L.; Almeida, C.; Carvalho, A.; Rodrigues, J.; Maciel, A.; Camargo, C. TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping. ISPRS International Journal of Geo-Information. 8, 513, 2019. doi.org/10.3390/ijgi8110513

Bera, D., Chatterjee, N das., Ghosh, S., Dinda, S., Bera, S. Recent trends of land surface temperature in relation to the influencing factors using Google Earth Engine platform and time series products in megacities of India, **Journal of Cleaner Production**, Vol. 379, 2022, doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134735.

COSTA, N. L.; DE SANTANA, A. C.; CORONEL, D. A.; BRUM, A. L.; CORRÊA DE MATTOS, C. A. Aspectos da importância do complexo soja no Brasil e no Rio Grande do Sul: 1997 – 2017. **Redes**, v. 25, n. 4, p. 1840-1863, 27 nov. 2020, doi.org/10.17058/redes.v25i4.12735

Ebrahimy, H., Aghighi, H., Azadbakht, M., Amani, M., Mahdavi, S., Matkan, A.A.

Downscaling MODIS Land Surface Temperature Product Using an Adaptive Random Forest Regression Method and Google Earth Engine for a 19 Years Spatiotemporal Trend Analysis Over Iran. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, vol. 14, pp. 2103-2112, 2021, doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3051422.

Eleftheriou, D., Kiachidis, K., Kalmintzis, G., Kalea, A., Bantasis, C., Koumadoraki, P., Spathara, M. E., Tsolaki, A., Tzampazidou, M. I., Gemitzi, A. Determination of annual and seasonal daytime and nighttime trends of MODIS LST over Greece - climate change implications, **Science of The Total Environment**, Vol. 616–617, 2018, Pages 937-947, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.226.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sens. Environ.** 202, 18–27, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA., 2004. Mapa da Vegetação do Brasil. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf.

IPCC. Parmesan, C., M.D. Morecroft, Y. Trisurat, R. Adrian, G.Z. Anshari, A. Arneth, Q. Gao, P. Gonzalez, R. Harris, J. Price, N. Stevens, and G.H. Talukdarr, 2022: Terrestrial and Freshwater Ecosystems and Their Services. In: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 197–377, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.004>.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2º Edição traduzida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São Paulo, Parêntese, 2009. 672 p. (Capítulo 8)

Mann, H. B. “Nonparametric Tests Against Trend.” **Econometrica**, v. 13, no. 3, 245–59, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria da Defesa Agropecuária. Portaria nº 840, de 7 de julho de 2023. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/1355202/1529289/PORTARIA+SDA_MAPA+N%C2%BA+840%2C+DE+7+DE+JULHO+DE+2023+-+Semeadura+de+Soja.pdf/72383a1e-a486-dc6d-afa3-72db17850d8b#:~:text=de%20Defesa%20Agropecu%C3%A1ria-PORTARIA%20SDA%2FMAPA%20N%C2%BA%20840%2C%20DE%207%20DE%20JULHO%20DE,referente%20a%20safra%202023%2F2024.

Patel, S., Indraganti, M., Jawarneh, R. N., A comprehensive systematic review: Impact of Land Use/ Land Cover (LULC) on Land Surface Temperatures (LST) and outdoor thermal comfort. **Building and Environment**, vol. 249, 2024, 111130, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111130>.

Peixoto, D. W. B., Trindade, P. M. P., Kuplich, T. M., Almeida, C. A. de. Análise da temperatura de superfície em diferentes coberturas do Bioma Pampa. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.15, n.01 (2022) 268-281.

Phan, T. N.; Kappas, M. Application of MODIS land surface temperature data: a systematic literature review and analysis. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.12, n. 4, p. 041501-, 2018, doi.org/10.1117/1.JRS.12.041501.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental. Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul. 6 ed. Porto Alegre, 2021. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/edicao>.

Sen, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau, **Journal of the American Statistical Association**, 63(324), pp. 1379–1389, 1968. doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934.

Souza, C.M., Jr.; Z. Shimbo, J.; Rosa, M.R.; Parente, L.L.; A. Alencar, A.; Rudorff, B.F.T.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; G. Ferreira, L.; Souza-Filho, P.W.M.; et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sens.** 2020, 12, 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>

Theil, H. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. In: Raj, B., Koerts, J. (eds) **Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics**, vol 23. Springer, Dordrecht, 1992 https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20.

Trindade, P. M. P., Peixoto, D. W. B., Kuplich, T.M., Almeida, C. A. de. Land covermapping in the brazilian Pampa with landsat OLI and TIRS bands. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 40, n. 4, p. 1115 -1124, 2021.

Wan, Z., Hook, S., Hulley, G. (2021). *MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061* [MYD11A2.061]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A1.061>

Zhao, S.; Zhao, X.; Zhao, J.; Liu, N.; Sun, M.; Mu, B.; Sun, N.; Guo, Y. Grassland Conservation Effectiveness of National Nature Reserves in Northern China. **Remote Sens.** 2022, 14, 1760. doi.org/10.3390/rs14071760.