



Nota Técnica: Elaboração dos Mapas de Índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil

1 Dados utilizados

Aridez é uma característica do clima que resulta do déficit hídrico gerado pela insuficiência da precipitação média e face à evapotranspiração potencial numa dada região. Um índice de aridez é um indicador numérico do grau de secura do clima em uma determinada região. Esses indicadores servem para identificar, localizar ou delimitar regiões com variável déficit de água disponível, condição que pode afetar severamente o uso efetivo da terra para atividades como agricultura ou pecuária e que no longo prazo podem levar a desertificação. (Stadler, 1987).

Para a estimativa do Índice de Aridez foram utilizados os dados em ponto de grade de Xavier et al. (2022). Esta base de dados é constituída por dados diários interpolados de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento a 2 m de altura, umidade relativa para o período compreendido entre 01 de janeiro de 1961 e 31 de julho de 2020. A fonte principal de dados desta base são as plataformas de coletas de dados da Agência Nacional de Águas – ANA e o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.

De acordo com Xavier et al. (2022), os dados das estações meteorológicas foram submetidos a um controle de qualidade baseado em dois critérios: o primeiro no intervalo de variação de cada parâmetro e o segundo na análise visual da precipitação com as estações vizinhas. Na espacialização (interpolação especial) das informações foram utilizados dois métodos: ponderação pelo inverso da distância e ponderação pela distância angular, uma vez que estes dois métodos mostraram melhor desempenho no teste de validação cruzada, dentre vários outros métodos avaliados (Xavier et al. 2016). No caso do inverso da distância foi usado um coeficiente de ponderação igual a 2. No caso da interpolação de dados de temperatura foram levados em conta efeitos de altitude. A figura abaixo, extraída de Xavier et al. (2021) mostra a disponibilidade de dados de dados de precipitação para todo o período do estudo.

Conforme mostrado na figura 1 (extraída de Xavier et al. 2022), a bacia amazônica tem uma estação a cada $\approx 7.600 \text{ km}^2$ entre 1991 e 2020, já entre 1961 a 1980 a densidade é de um pluviômetro cada $\approx 150.000 \text{ km}^2$. Por outro lado, as bacias do Atlântico Central e da região do Atlântico Sul apresentaram a maior densidade pluviométrica, com pelo menos um pluviômetro a cada 50 km, correspondendo a um pluviômetro por $\approx 580 \text{ km}^2$. Para referência, WMO (2008) sugeriu um pluviômetro sem registro por 575 km^2 para planícies interiores. Em todo o Brasil, o número máximo de pluviômetros, com dados observados disponíveis, foi de 5.972 (um pluviômetro por 1.425 km^2), entre as décadas de 1970 e 1980.

A figura 2 mostra o mesmo gráfico para as estações meteorológicas com dados de temperatura máxima. A bacia do rio Amazonas teve a menor densidade entre todas as bacias, com uma estação por $\approx 250.000 \text{ km}^2$ até 2003, e uma cada $\approx 150.000 \text{ km}^2$ nos últimos anos. As bacias da região do Atlântico Central e da região do Atlântico Sul apresentaram maiores densidades, com uma estação meteorológica por $\approx 5.000 - 12.000 \text{ km}^2$. Para comparação, a densidade na Suíça corresponde a uma estação de temperatura por 475 e 5.000 km^2 .

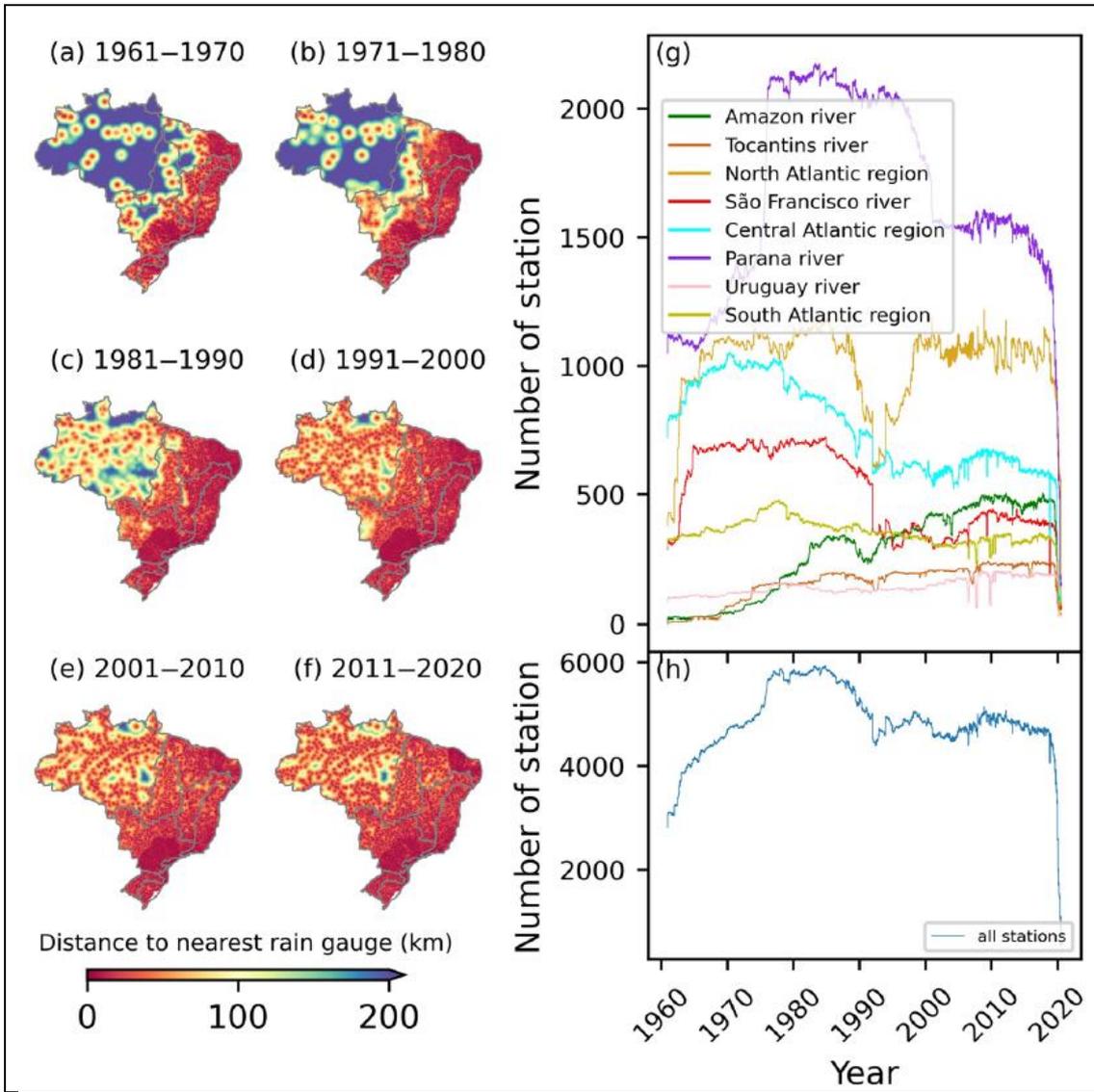
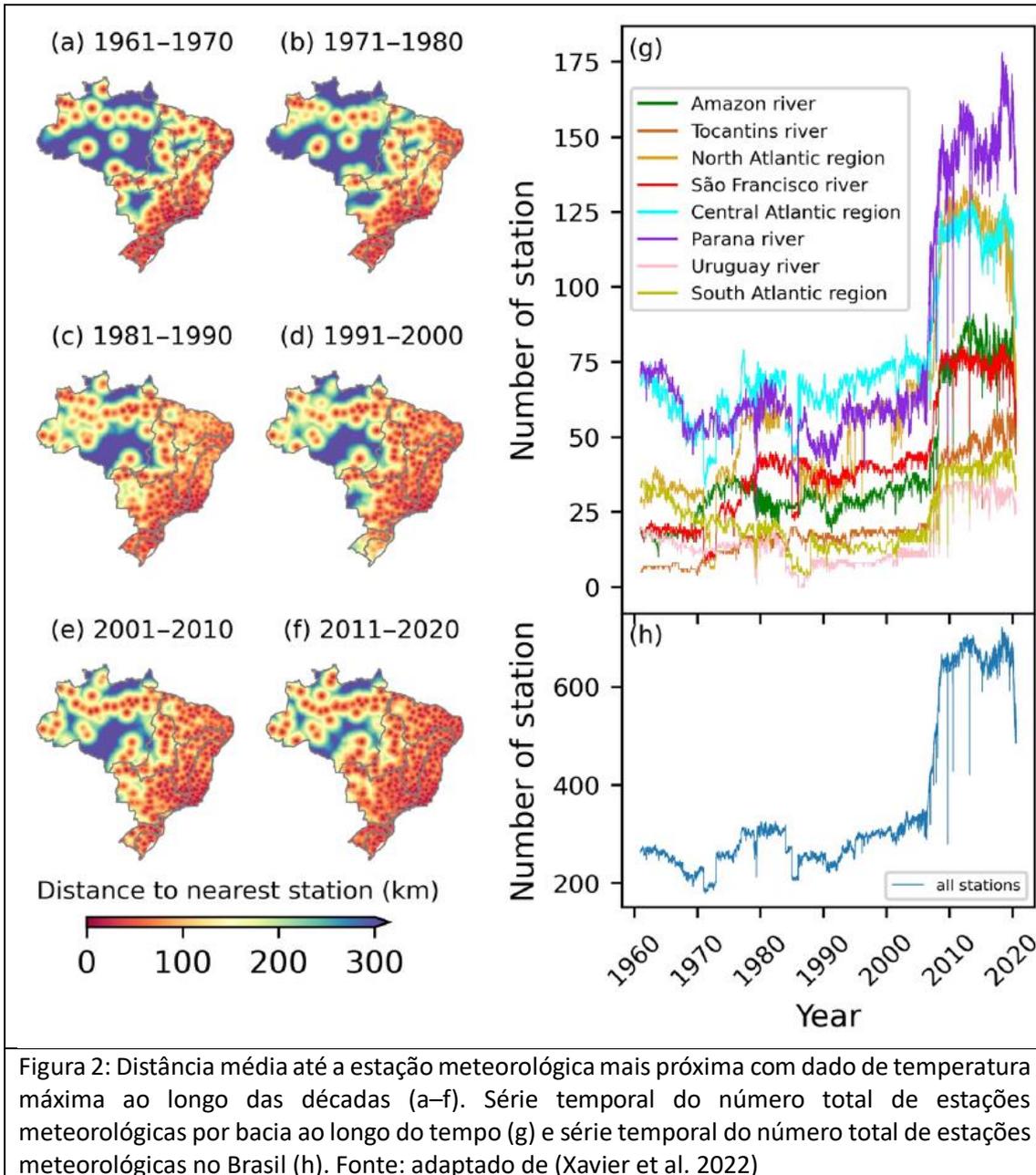


Figura 1: Distância média até o pluviômetro mais próximo ao longo das décadas (a–f). Série temporal do número total de pluviômetros por bacia ao longo do tempo (g) e série temporal do número total de pluviômetros no Brasil (h). Fonte: adaptado de (Xavier et al. 2022)



Usando os dados interpolados de temperatura máxima - T_{max} , temperatura mínima - T_{min} , Umidade relativa - RH , velocidade do vento a 2 m - u_2 ; e a radiação solar - R_s , Xavier et al. (2022) estimaram a evapotranspiração de referência usando o método FAO Penman-Monteith (ET_o , Allen et al. 1998) conforme:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

onde ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}), R_n é a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), G é a densidade do fluxo do calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), T é a temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$), u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s é a pressão de vapor de saturação (kPa),



e_a é a pressão de vapor real (kPa), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor de (kPa), Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) e γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$). No cálculo G foi considerado igual a zero; T foi calculada como a média de T_{max} e T_{min} ; e_a foi estimada com auxílio de RH , T_{max} e T_{min} :

$$e_a = \frac{RH}{100} \left(\frac{e_0(T_{max}) + e_0(T_{min})}{2} \right)$$

Send0 $e_0(T_{max})$ $e_0(T_{min})$ são, respectivamente, a pressão de vapor de saturação na temperatura máxima e mínima do ar. Finalmente a radiação líquida R_n foi calculada como:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

onde R_{ns} é a radiação líquida de onda curta incidente; R_{nl} é a radiação líquida de onda longa emitida. R_{nl} é calculada usando T_{max} , T_{min} , e_a ; R_s ; R_{no} , e R_{no} é a radiação de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) que é calculada a partir da época do ano e da latitude da estação.

Mais detalhes sobre a base de dados utilizada neste estudo podem ser encontrados em Xavier et al. (2016) e Xavier et al. (2022).



2 Validação adicional da base de dados de Xavier et al. (2022)

Tomasella et al. (2023) usaram a base de dados de Xavier et al. (2022) para avaliar índice de secas no Brasil no período 1980-2019 utilizando o índice de precipitação padronizada -SPI (Gutman (1999) e o índice de Índice de Evapotranspiração e Precipitação Padronizada – SPEI (Vicente-Serrano et al. 2010) estimado conforme metodologia sugerida por Beguería et al. (2014).

Neste estudo foram comparados valores de SPEI calculados a partir de estações meteorológicas e extraídos da base de dados de Xavier et al. (2022), neste caso usando o pixel correspondente à localização da estação meteorológica. As estações utilizadas nesta validação contam na Tabela 1

Tabela 1: estações meteorológicas usadas na validação dos dados de Xavier et al. (2022)

Estação	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Altitude (m)	Precipitação (mm)	Evaporação (mm)
Belém	-1.43	-48.43	7.13	3084.0	1888.7
Belo Horizonte	-19.93	-43.95	915.47	1602.6	1452
Brasília	-15.78	-47.92	1161.42	1477.4	1263.2
Campina Grande	-7.22	-35.90	546.27	777.0	1343.7
Campo Grande	-20.44	-54.72	528.43	1455.3	1753.7
Catanduva	-21.12	-48.94	570.34	1316.0	1738.7
Cuiabá	-15.61	-56.10	157.70	1454.5	2332.8
Curitiba	-25.44	-49.23	923.50	1575.8	1205.5
Fortaleza	-3.81	-38.53	29.89	1668.9	1969.5
Manaus	-3.10	-60.01	48.86	2301.2	2308.1
Maringá	-23.40	-51.91	542	1642.9	1673.8
Natal	-5.83	-35.20	47.68	1721.4	1841.1
Porto Velho	-8.79	-63.84	86.12	1875.9	1689.4
Recife	-8.05	-34.95	11.30	2263.4	1785.2
Rio Branco	-9.95	-67.86	160.71	1997.6	1847.1
Santa Maria	-29.72	-53.72	103.10	1796.2	1635.9
São Félix Do Xingu	-6.63	-51.97	195.98	2041.2	1733.9
São Paulo	-23.49	-46.61	785.16	1616.0	1409.1
Teresina	-5.03	-42.80	75.73	1325.0	2330

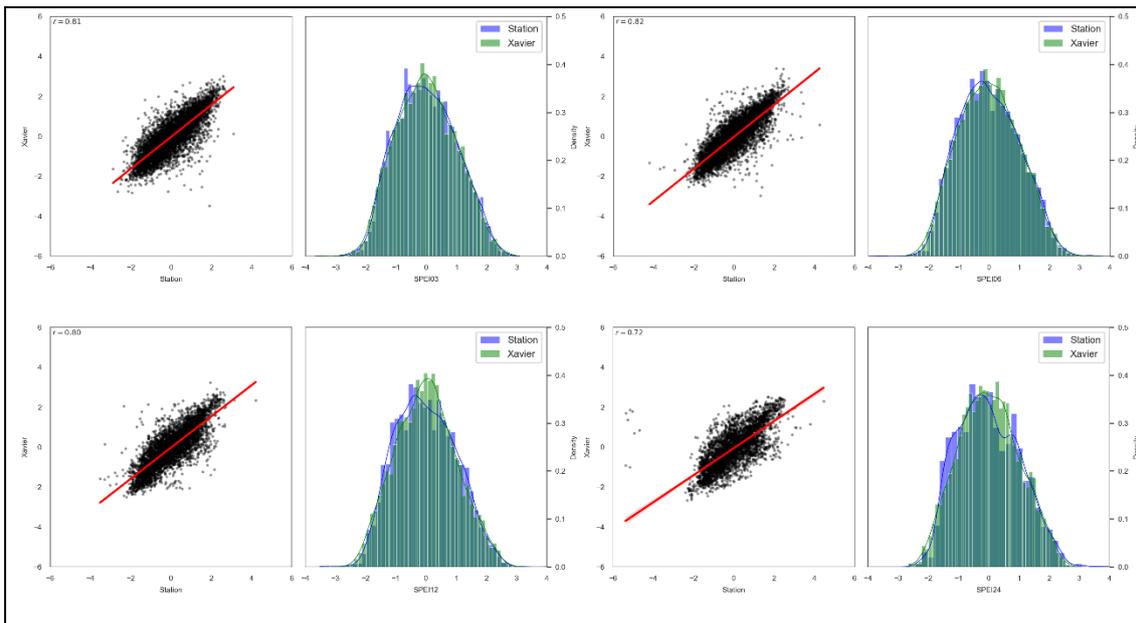


Figura 3: Gráficos de dispersão, densidade e histogramas dos valores de SPEI estimados usando dados da estação meteorológica contra o pixel SPEI correspondente derivado dos dados em grade de Xavier et al. (2022), para o período 1981-2016 e para diferentes escalas temporais. Fonte: adaptado de (Tomasella et al. 2023).



3 Estimativa de índice de aridez para o Brasil

Para estimar o Índice de Aridez utilizou-se os dados em ponto de grade de Xavier et al. (2022) para diferentes períodos históricos conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2: Períodos utilizados no cálculo do Índice de aridez

Denominação	Período
"1960-1990"	01/01/1961-31/12/1990
"1970-2000"	01/01/1970-31/12/2000
"1980-2010"	01/01/1980-31/12/2010
"1990-2020"	01/01/1990-31/07/2020

Ressalta-se que os períodos denominados "1960-1990" e "1990-2020" de fato não incluem o número de dias completos em razão da disponibilidade de dados da base de Xavier et al. (2022). Entretanto, a significância estatística dessa omissão pode ser considerada pouco significativa em razão da representatividade da base de dados.

O índice de aridez foi calculado como a razão entre a chuva acumulada em cada um dos períodos e a evapotranspiração de referência acumulada no mesmo período delimitando 3 limares do valor do IA: 0,2; 0,5 e 0,65 que definem, respectivamente, as classificações árida, semiárido e sub úmido seco. As figuras 4-7 mostram a distribuição espacial do índice de aridez para cada um dos períodos considerados na tabela anterior.

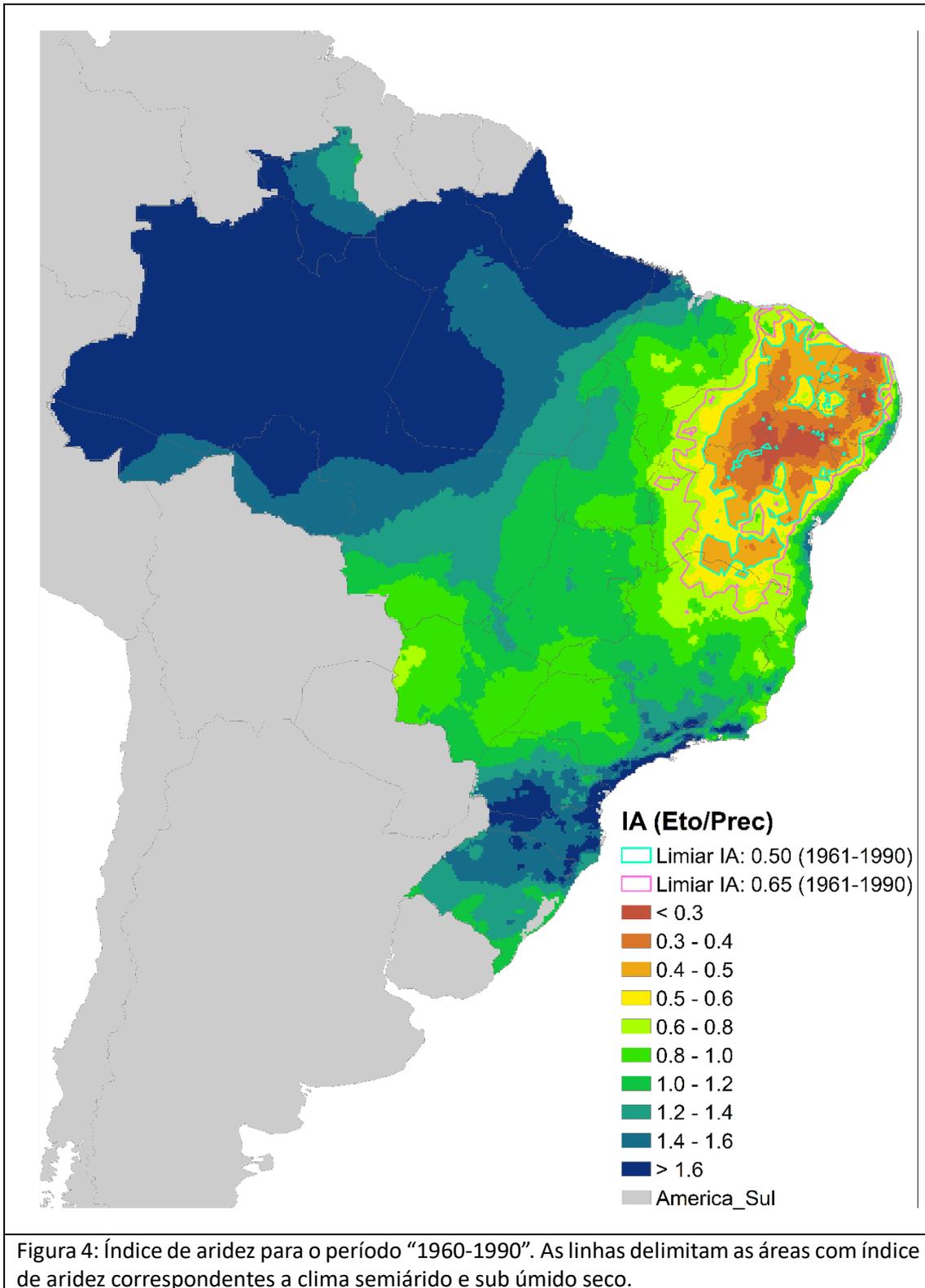


Figura 4: Índice de aridez para o período “1960-1990”. As linhas delimitam as áreas com índice de aridez correspondentes a clima semiárido e sub úmido seco.

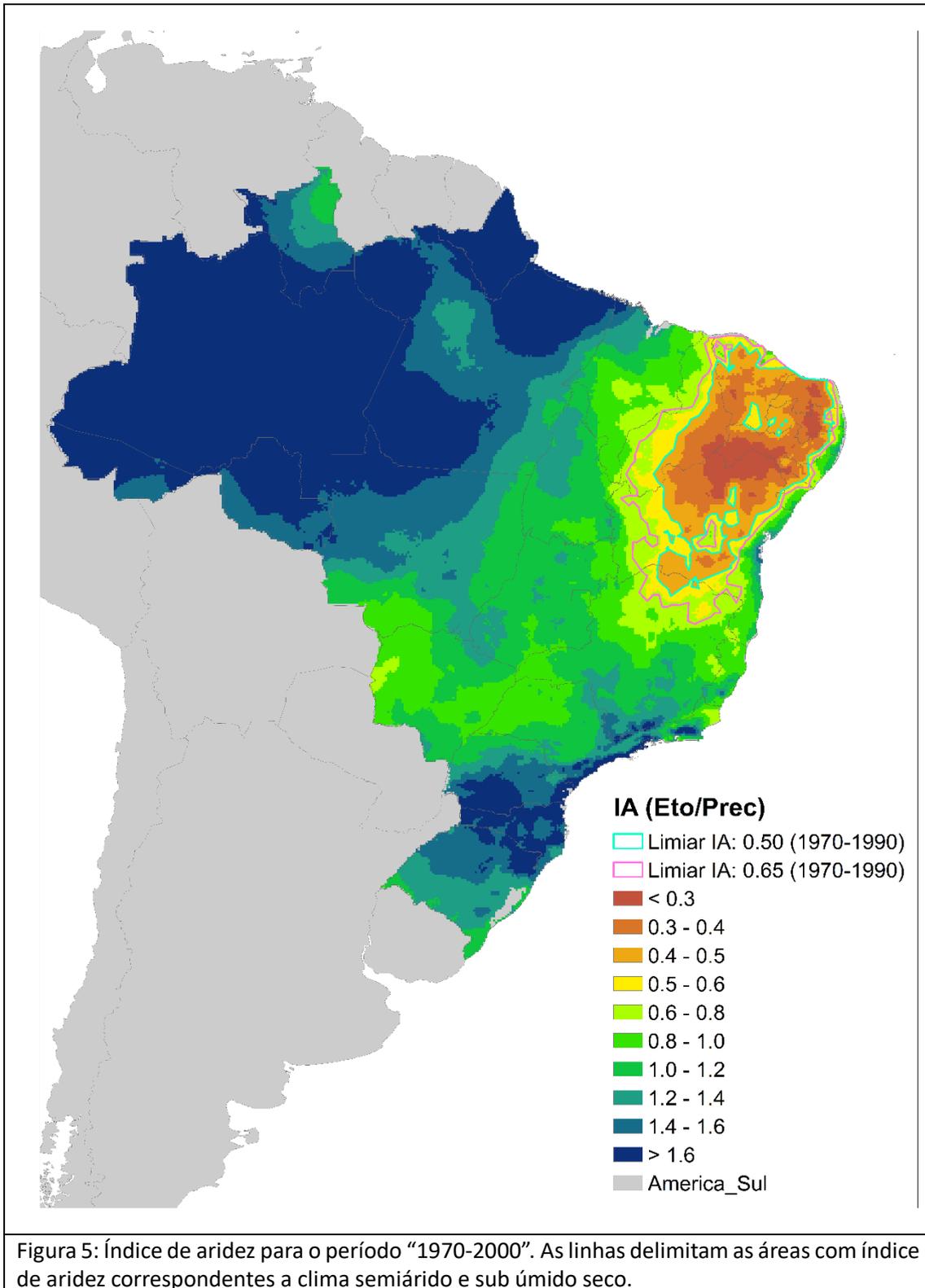


Figura 5: Índice de aridez para o período “1970-2000”. As linhas delimitam as áreas com índice de aridez correspondentes a clima semiárido e sub úmido seco.

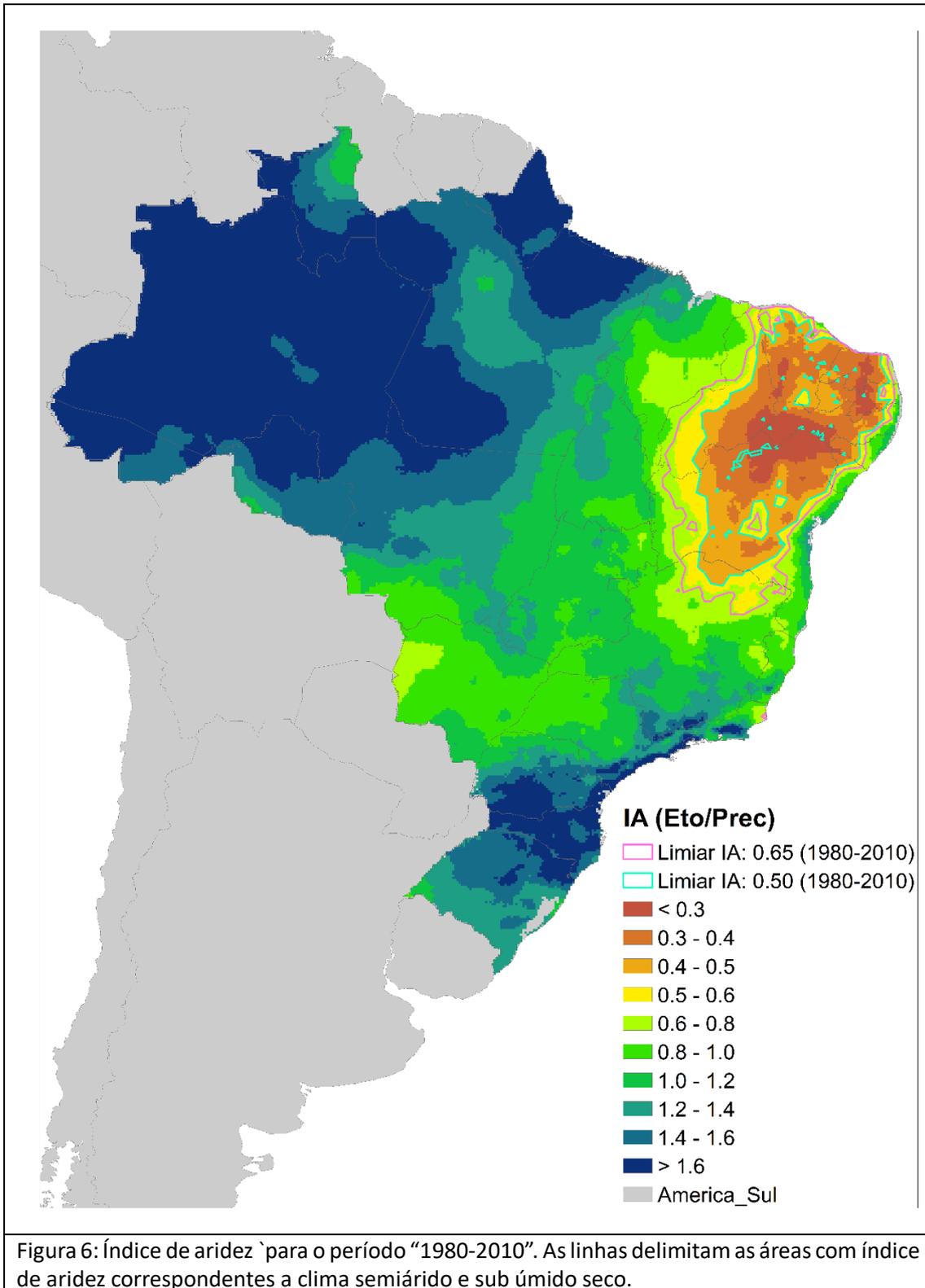


Figura 6: Índice de aridez para o período "1980-2010". As linhas delimitam as áreas com índice de aridez correspondentes a clima semiárido e sub úmido seco.

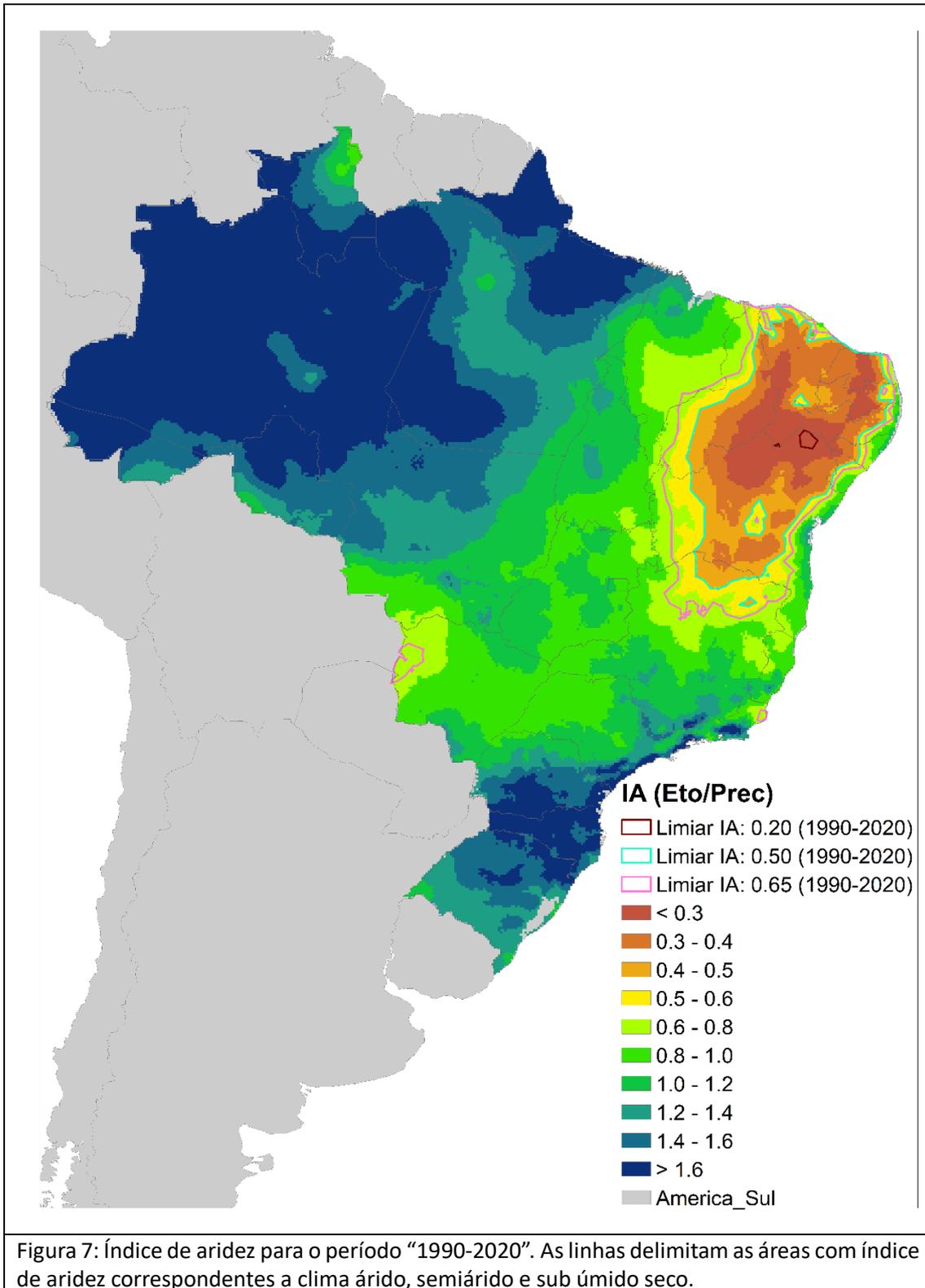


Figura 7: Índice de aridez para o período “1990-2020”. As linhas delimitam as áreas com índice de aridez correspondentes a clima árido, semiárido e sub úmido seco.

Áreas com índice de aridez inferior a 0.2 (árido) somente foram constatadas no último período “1990-2020” em uma área localizada no centro norte da Bahia.

As áreas com índices inferiores a 0.5 (semiárido), localizam-se no interior da região Nordeste (exceto Maranhão) e no norte de Minas Gerais. Todavia, os mapas destacam áreas no interior da região com índices superiores a 0.5 como é o caso da Chapada Diamantina e o Cariri. Todavia os mapas resultantes conseguem delimitar outros microclimas como o caso do maciço de Baturité, a Serra de Ibiapaba e o planalto da Borborema.

As áreas classificadas como clima sub úmido seco, com índice de aridez entre 0.5 e 0.65, podem ser observadas na Região Nordeste e norte de Minas Gerais em todos os períodos analisados. Todavia, no caso do período “1990-2020”, são observadas áreas sub úmidas secas no Estado do Mato Grosso do Sul, na bacia do Rio Paraguai, e em uma pequena área no norte do Estado do Rio de Janeiro.

De maneira consistente observa-se um aumento de área classificada com semiárida ao longo das décadas. A figura 8 mostra a variação histórica do contorno de 0.5. O aumento da área ocorre principalmente ao Oeste da Região Nordeste e se expande pelo norte de Minas Gerais, ao sul do mapa da Figura 8. Também, observa-se a retração das áreas incluídas na região, mas que apresentam índices superiores a 0.5, áreas conhecidas como “microclimas” do Nordeste. Ou seja, os dados mostram um aumento da área classificada como semiárida em toda a região.

No que tange às superfícies incluídas dentro dos limites do Índice de aridez inferiores a 0.5 e 0.65, respectivamente, a tabela 3 mostra a evolução histórica da área em km² e as Figuras 8 e 9 ilustram essa evolução. Esse cálculo exclui as áreas do interior do semiárido que delimitam os microclimas do Nordeste.

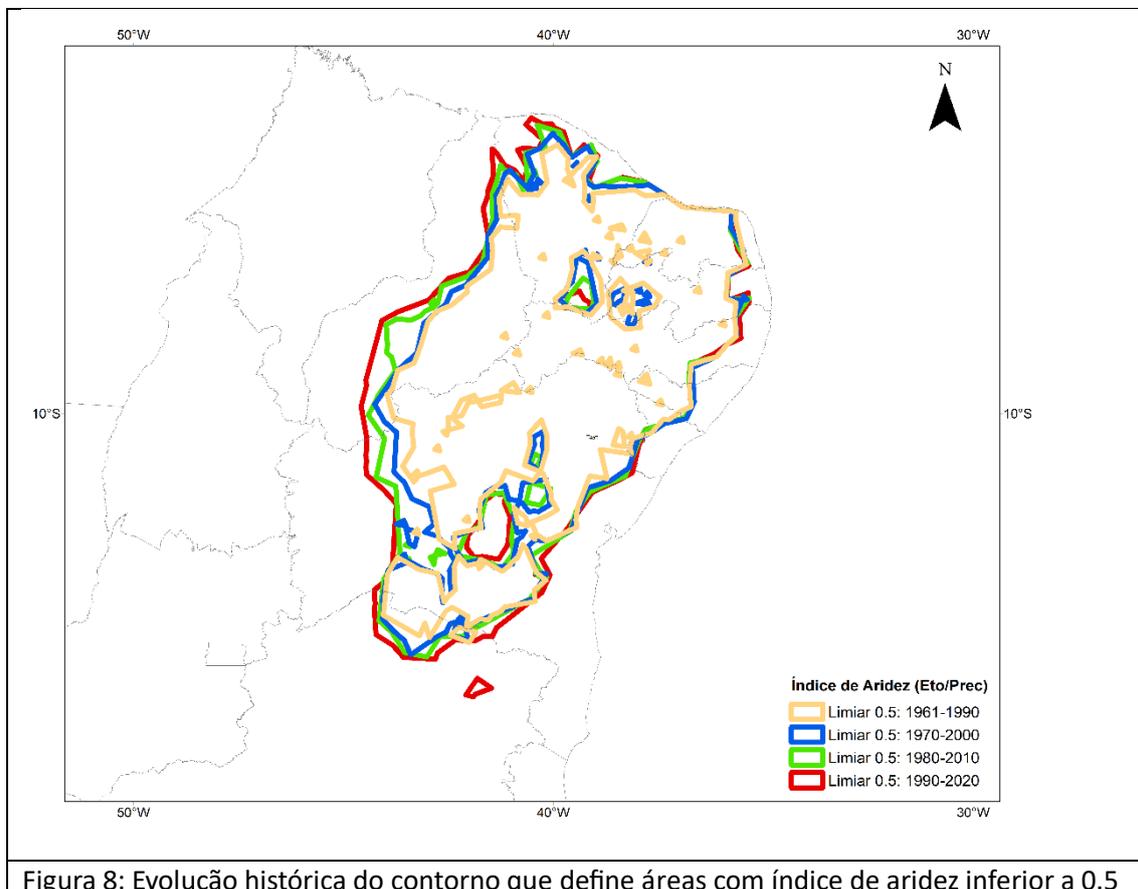
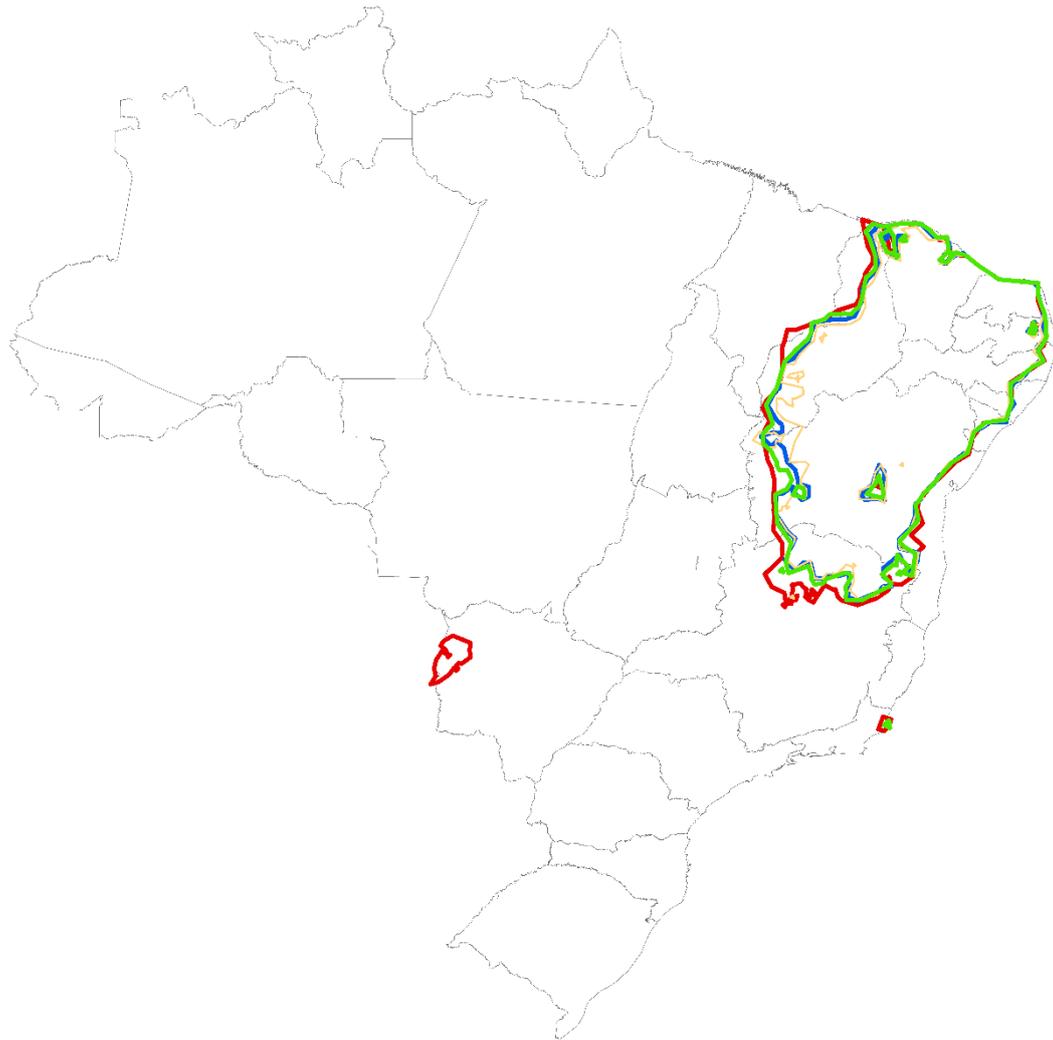


Figura 8: Evolução histórica do contorno que define áreas com índice de aridez inferior a 0.5



Índice de Aridez (Eto/Prec)

- Limiar IA: 0.65 (1961-1990)
- Limiar IA: 0.65 (1970-1990)
- Limiar IA: 0.65 (1980-2010)
- Limiar IA: 0.65 (1990-2020)

Figura 9: Evolução histórica do contorno que define áreas com índice de aridez inferior a 0.65.



A figura 9 mostra que as áreas de semiárido se expandem no oeste da região Nordeste, nos Estados do Piauí e da Bahia; bem como no Norte de Minas Gerais. Com relação à área classificada como sub úmida seca (Figura 9) a expansão da área é perceptível apenas no período mais recente da análise. Neste caso a expansão desta área corre ao Oeste da Região Nordeste, no norte de Minas Gerais e em outras áreas do país fora da região Nordeste.

A tabela 3 indica que as áreas classificadas como semiárido aumentaram em média 75 mil km² por década (média móvel – janelas de 30 anos), enquanto as áreas consideradas sub úmido seco mostraram uma redução média de 12 mil km² por década. Enquanto que nos períodos 1970-2000 e 1980-2010 nota-se um aumento da área semiárida a expensas da área sub úmida seca, no período 1990-2020 as áreas das três classificações apresentaram aumento, sugerindo uma aceleração da tendência. Somando todas as áreas (árido, semiárido e sub úmido seco), esse incremento médio foi de 65 mil km² por década.

Tabela 3: expansão das áreas em km² com IA menor a 0.2 (árido), entre 0.2 e 0.5 (semiárido) e 0.5 e 0.65 (sub úmido seco)

Período	Árido < 0.2		Semiárido 0.2 < IA < 0.5		Sub úmido seco 0.5 < IA < 0.65	
	Área	Incremento	Área	Incremento	Área	Incremento
1960-1990	0		569497		365528	
1970-2000	0	0	663066	93569	331282	-34247
1980-2010	0	0	726373	63307	308246	-23036
1990-2020	5763	5763	796175	69801	329075	20829

A figura 11 mostra a evolução histórica das três áreas consideradas.

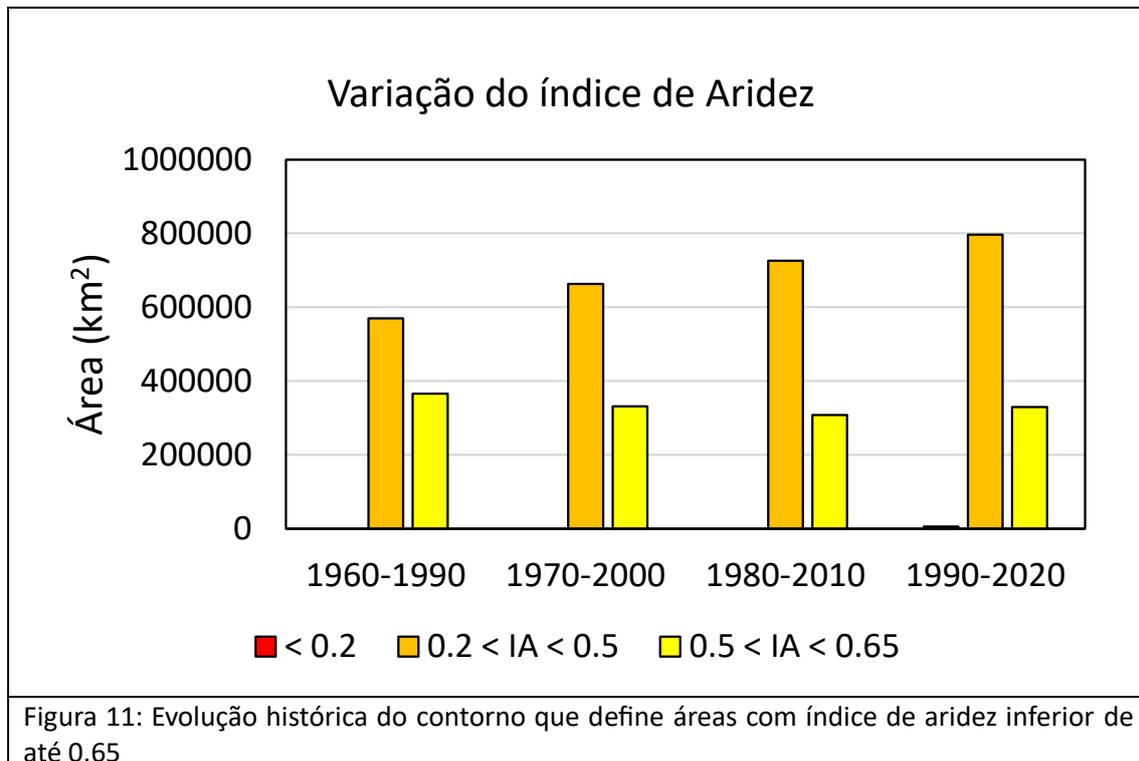
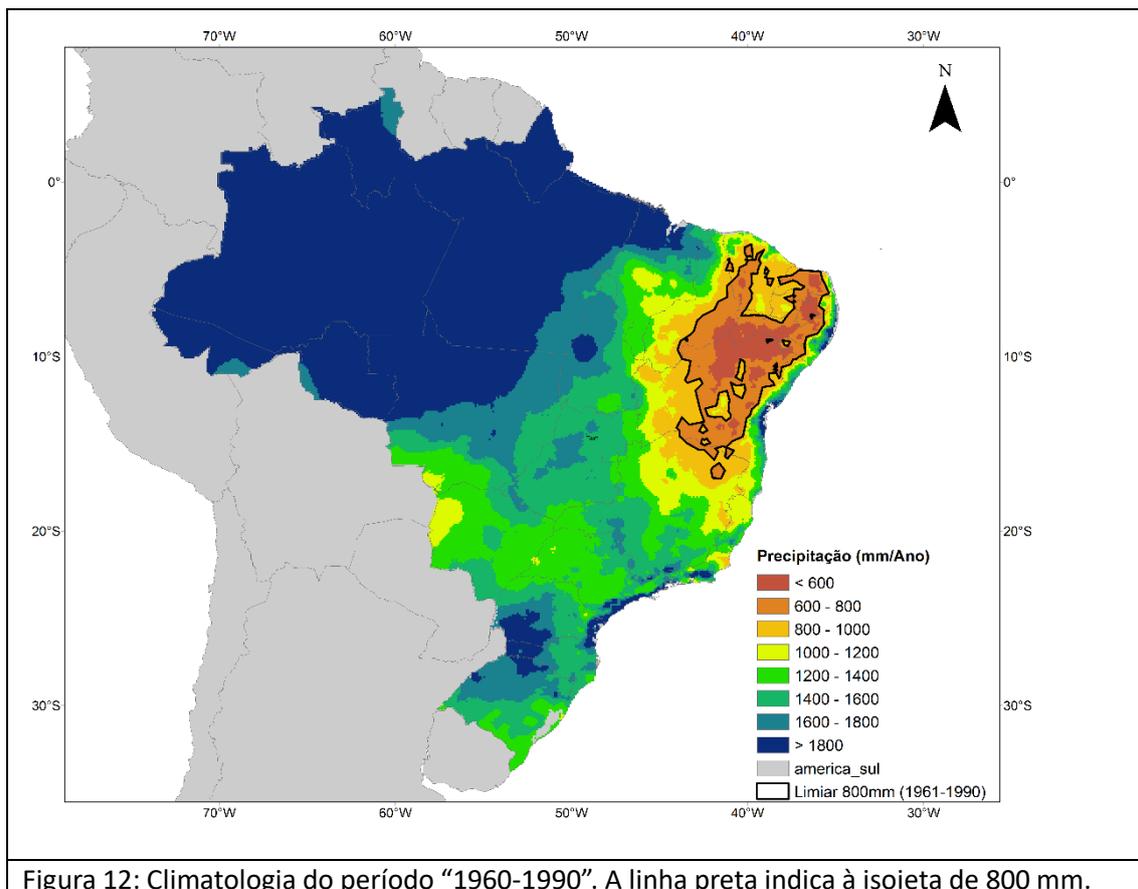


Figura 11: Evolução histórica do contorno que define áreas com índice de aridez inferior de até 0.65

4 Índice de precipitação (precipitação total acumulada)

Considerando que um dos critérios de delimitação do semiárido legal é o espaço geográfico delimitado pela isoietas de 800 mm, foi incluído neste estudo para cada um dos períodos históricos considerados na Tabela 2. As figuras 12-15 mostram as áreas delimitadas nesta análise



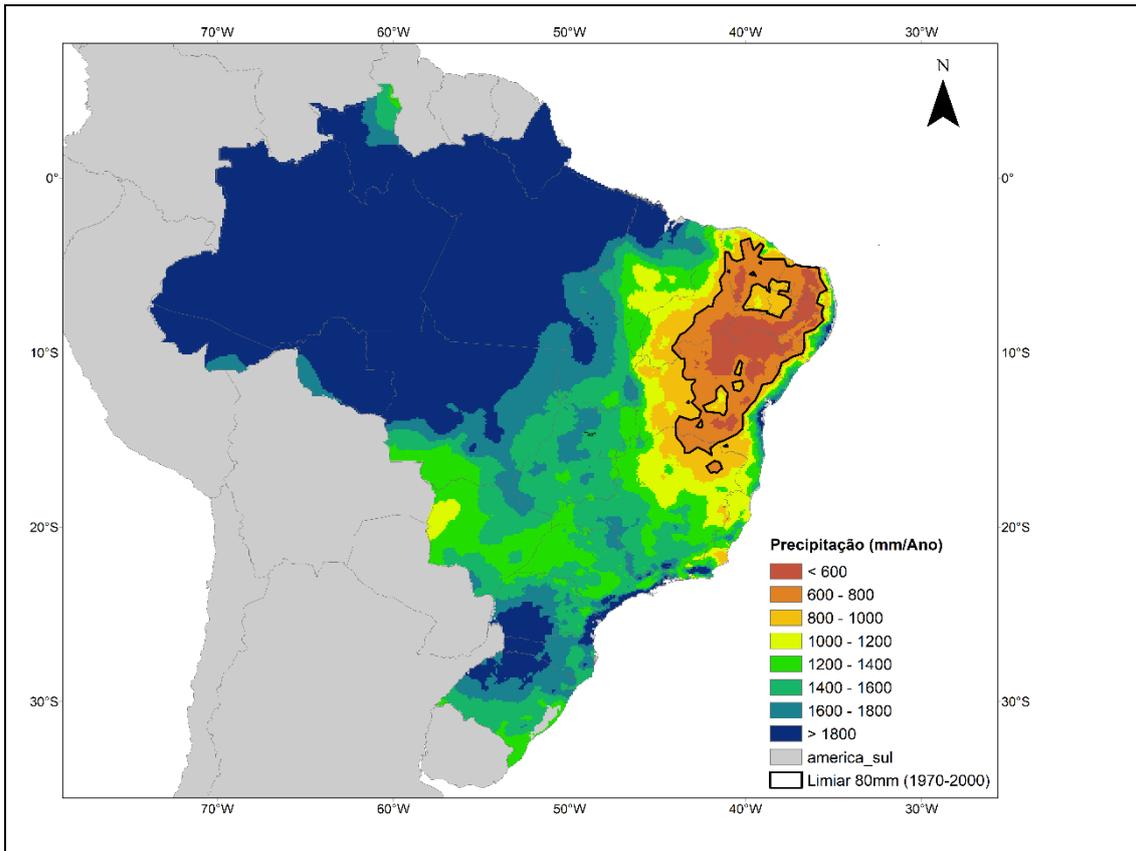


Figura 13: Climatologia do período “1970-2000”. A linha preta indica à isoietta de 800 mm.

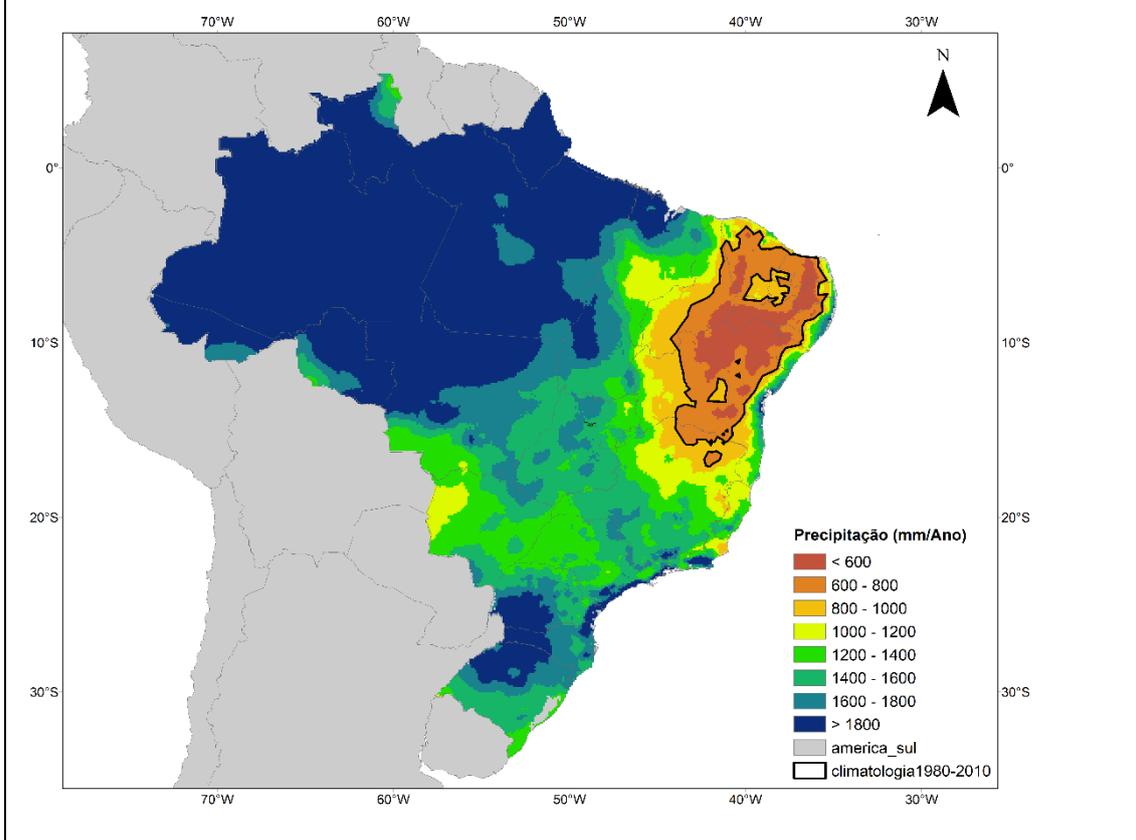
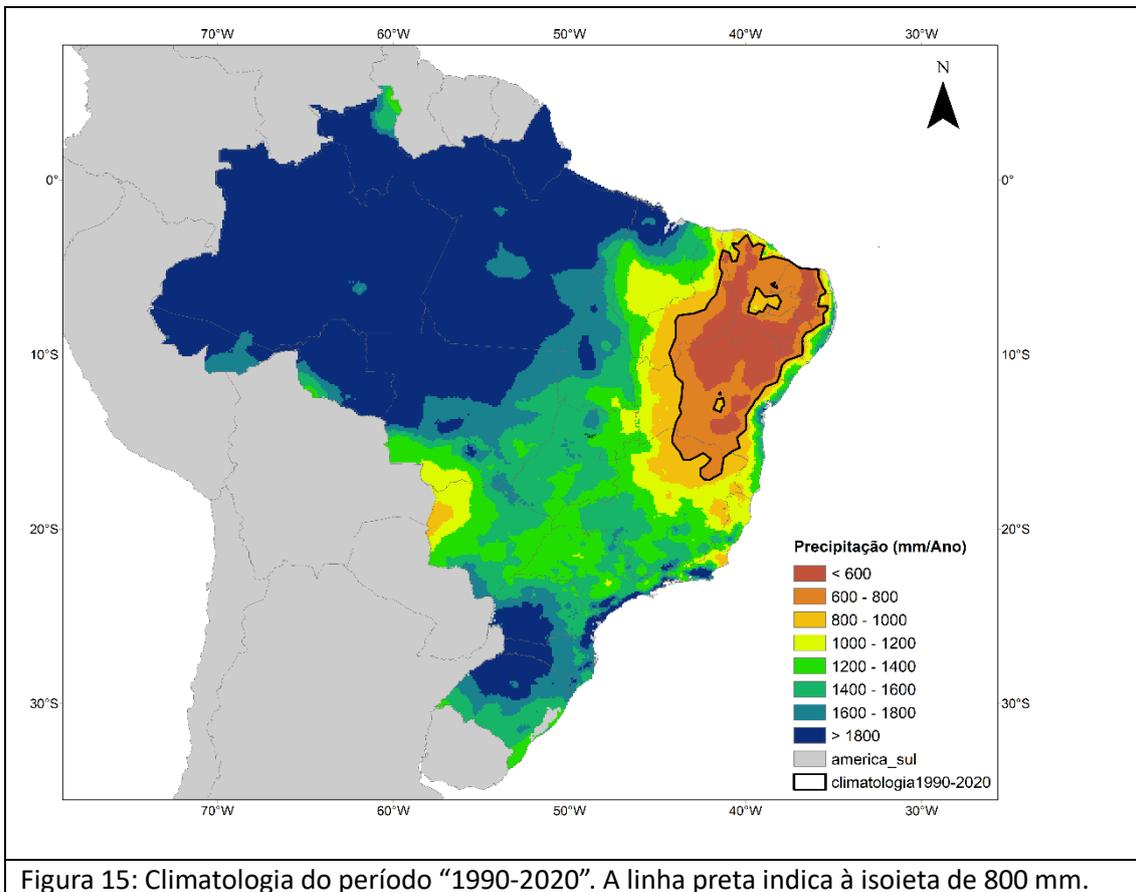


Figura 14: Climatologia do período “1980-2010”. A linha preta indica à isoietta de 800 mm.



Da mesma forma que há uma expansão da área incluída no índice de aridez de 0.5, a área delimitada pela isoietta de 800 mm tem se ampliado ao longo das décadas.

A figura 16 mostra os contornos da área delimitada pela isoietta de 800 mm com foco no Nordeste do país. Se comparado com a figura 9, os resultados da figura 16 mostram uma ampliação de área mais modesta quando considerarmos unicamente a precipitação. Isto se deve ao fato de que o aumento da temperatura tem efeito direto no cálculo da evaporação e, portanto, naqueles índices que refletem a evaporação de referência, conforme mostrado por Tomasella et al. (2023). O critério do índice de aridez abrange uma área comparativamente maior do que o delimitado pela isoietta de 800 mm em quase toda a região, com exceção do Norte de Minas Gerais

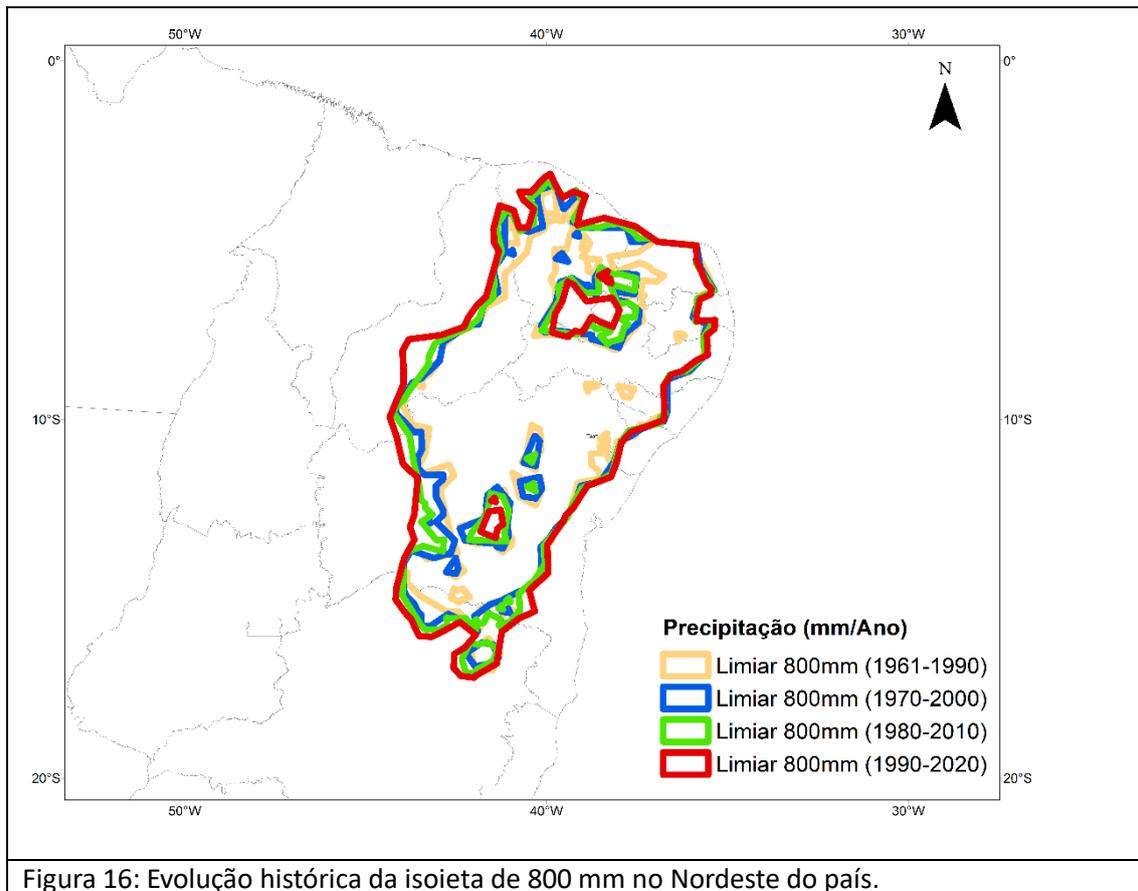


Figura 16: Evolução histórica da isoietta de 800 mm no Nordeste do país.

5 Conclusão

- Há uma tendência ao aumento da aridez em todo o país, exceto na região sul. Este fator se deve principalmente ao aumento da evaporação associada com aumento da temperatura – aquecimento global
- Observa-se um efeito de expansão das áreas do semiárido do país, a uma taxa média superior a 75 mil km² a cada década considerada. Se for incluída a área classificada como sub úmida seca esta taxa é da ordem de 65 mil km² a cada década.
- Estas diferenças se devem ao fato de que a região sub úmida seca mostrou redução nos períodos 1970-2000 e 1980-2010, concomitante com o aumento da área semiárida, mas mostrou tendência de aumento no período 1990-2020 sugerindo um aumento de aceleração do processo em períodos mais recentes.
- As áreas classificadas como semiáridas se concentram na região Nordeste (exceto Maranhão) e norte de Minas Gerais. Com relação as áreas sub úmidas secas, além da



MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO**



Região Nordeste e Norte de Minas Gerais, foram identificadas ocorrências no Norte do Rio de Janeiro e no Mato Grosso do Sul.

- No último período considerado, 1990-2020, observou-se o aparecimento de área definidas como áridas no centro da Região Nordeste

Elaboração:

Javier Tomasella

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - MCTI

Ana Paula de Amaral Cunha

Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais - MCTI

José Antonio Marengo

Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais - MCTI



6 Referências

Allen R.G., D. R. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. United Nations, FAO, Rome, Italy, 1 edition, 1998. URL <http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf>.

Beguería S, Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10): 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.

Guttman NB. 1999. Accepting the standardized precipitation index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>.

Stadler, S. J (1987) Aridity Indexes, I n *The Encyclopedia of Climatology*, p. 102–107, Edited by J. E. Oliver and R. W. Fairbridge, Van Nostrand Reinhold Company, New York, [ISBN 0-87933-009-0](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x).

Tomasella, J., Cunha, A.P.M.A., Simões, P.A. et al. Assessment of trends, variability and impacts of droughts across Brazil over the period 1980–2019. *Nat Hazards* 116, 2173–2190 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05759-0>

Vicente-Serrano SM, Beguería S, López-Moreno JI. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.

Xavier, A.C., King, C.W. and Scanlon, B.R. (2016) Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, 36, 2644–2659. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>

Xavier, A. C., Scanlon, B. R., King, C. W., & Alves, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, 1–15. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>