

RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE SEQUÍA USANDO DATOS METEOROLÓGICOS Y SATELITALES, EN LA ESTEPA MAGALLÁNICA SECA (PATAGONIA)

PAREDES PAULA^{1,2}
MAGLIONE DORA¹
SANDOVAL MARISA¹
SOTO JULIO¹
BONFILI OSCAR³
HUMANO GERVASIO²

pparedes@uarg.unpa.edu.ar

¹Universidad Nacional de la Patagonia Austral

²Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

³Servicio Meteorológico Nacional

Resumen

Los efectos de la sequía impactan en el sector productivo de las distintas regiones, incidiendo en la vegetación, la disponibilidad de agua y las consecuencias que ello ocasiona, por lo que resulta de interés el estudio de su comportamiento, a fin de poder realizar monitoreo y alertas tempranas. Existen en la literatura distintos índices propuestos, algunos se obtienen a partir de datos meteorológicos, y otros a partir de imágenes satelitales. El objetivo del presente trabajo es relacionar índices de sequía obtenidos con datos de estaciones meteorológicas (Anomalía de Precipitación- AP, el Índice Estandarizado de Precipitación -SPI, el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración- SPEI), índices de sensores remotos de MODIS (Índice Normalizado de Sequía- NDDI, Índice Normalizado de Agua- NDWI, Índice Normalizado de Vegetación- NDVI, Índice de Vegetación Mejorado- EVI) y anomalías de éstos últimos para el área ecológica Estepa Magallánica Seca, considerando el período 2000 - 2019. Los resultados muestran que el SPI calculado en la escala de 12 meses se correlaciona de manera moderada con la anomalía de NDWI, aunque ambas, al igual que el NDDI, permiten detectar los eventos de sequías en el período considerado.

Palabras claves: SPI - NDVI - NDWI - NDDI

Abstract

The effects of drought have an impact on the productive sector in different regions, affecting vegetation, water availability and the consequences that this causes, so it is of interest to study its behaviour in order to be able to carry out monitoring and early warnings. There are different proposed indices in the literature, some of which are obtained from meteorological data, and others from satellite images. The objective of the present work is to relate drought indices obtained with data from meteorological stations (Anomaly of Precipitation - AP, the Standardized Precipitation Index -SPI, the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index - SPEI), MODIS remote sensing indices (Normalized Drought Index- NDDI, Normalized Water Index- NDWI, Normalized Vegetation Index- NDVI, Enhanced Vegetation Index- EVI) and anomalies of the latter for the Dry Magellanic Steppe ecological area, considering the period 2000 - 2019. The results show that the SPI calculated at the 12-month scale correlates moderately with the NDWI anomaly, although both, like the NDDI, allow the detection of drought events in the period considered.

keywords: SPI - NDVI - NDWI - NDDI

Introducción

La sequía es un fenómeno meteorológico progresivo (Gillette, 1950), que implica la falta de precipitación en los sistemas naturales, y eventualmente afectan la condición de la vegetación (Kogan, 1997). Un denominador común en relación a las muchas definiciones dadas de sequía (Organización de las Naciones Unidas, 1994; Organización Meteorológica Mundial, 2006, entre otros), es que todas coinciden en que corresponde a una escasez de precipitación en relación al comportamiento “normal”, considerado este último como un promedio de una serie histórica de precipitaciones. Las diferencias en el concepto de sequía radican en la manera e intensidad en que impacta y sus efectos sobre diferentes ambientes naturales.

Wilhite & Glantz (1985) definen cuatro tipos de sequías a partir de su origen y los efectos que produce: meteorológica (relacionada al grado de desviación de la precipitación en comparación a un comportamiento “normal”), agrícola (que está relacionada a la anterior y al impacto en los cultivos), hidrológica (relacionada a los efectos de periodos de precipitación relativamente cortos, es decir los escurrimientos a nivel de superficie y subsuelo) y socio-económica (en términos de suministro de agua y demanda por grupos humanos) (Figura 1). Conocer las características de las sequías (intensidad, duración, extensión espacial) puede ayudar a calcular y predecir pérdidas económico-productivas de una región.

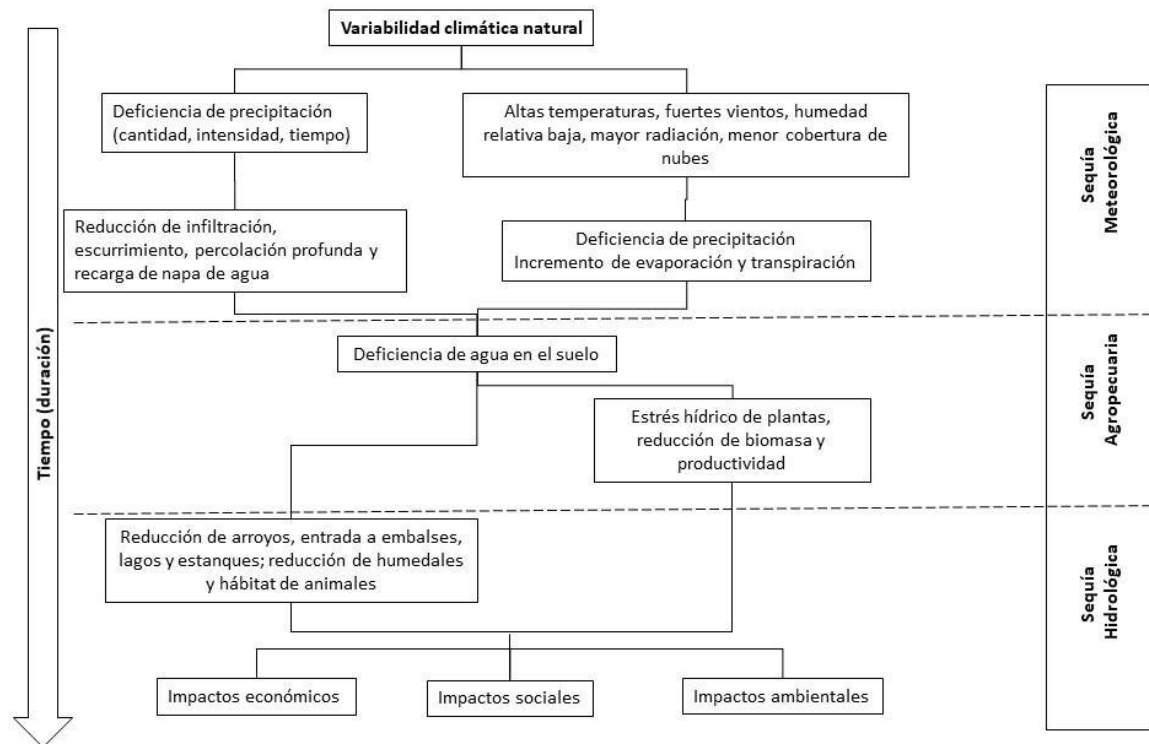


Figura 1 Secuencia de ocurrencia e impactos de los tipos de sequías. (NDMC -National Drought Mitigation Center, 2020)

Los datos meteorológicos son una fuente confiable de información para estudiar estos fenómenos. Sin embargo, la disponibilidad de estos datos está limitada por la cantidad de estaciones o la accesibilidad. Particularmente en el sur de la Patagonia, es notable la escasez de estaciones, y las series temporales que existen son relativamente cortas en la mayoría de ellas. Una alternativa para cubrir estas falencias es utilizar sensores remotos, que tienen la ventaja de cubrir grandes áreas a bajo costo. Desde hace décadas existen trabajos que han relacionado exitosamente datos meteorológicos de terreno con los obtenidos de imágenes satelitales (Fonnegra Mora, 2017; Soto et al., 2020; Vaiman, 2018, entre otros).

Algunos de los índices que se pueden calcular usando datos meteorológicos son la Anomalía de Precipitación (AP, obtenido a partir de estandarizar los valores en cada periodo considerado), el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés *Standardized Precipitation Index*, desarrollado por McKee et al., 1993) y el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI, por *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*, propuesto por Vicente-Serrano et al., 2010). Los dos primeros hacen uso de la serie temporal de precipitaciones, y el último incorpora además la temperatura. Estos índices pueden ser calculados en distintas escalas

temporales, lo que permite analizar los tipos de sequía, en particular las obtenidas usando la escala de 6 y 12 meses están vinculadas con la sequía agropecuaria.

A partir de datos satelitales es posible calcular índices relacionados a la condición de la vegetación, como el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, *Normalized Difference Vegetation index*, Rouse Jr et al., 1974), el Índice de Agua Normalizado (NDWI, *Normalized Difference Water Index*, Gao, 1996), el Índice Normalizado de Sequías (NDDI, *Normalized Difference Drought Index*, Gu et al., 2007), el Índice de Condición De la Vegetación (VCI, *Vegetation Condition Index*), entre otros. Permitiendo evaluar y monitorear sequías (Gu et al., 2007; Kogan, 1997).

El objetivo del presente trabajo fue relacionar índices de sequía obtenidos con datos de estaciones meteorológicas (AP, SPI, SPEI), índices de sensores remotos de MODIS (NDDI, NDWI, NDVI, EVI) y anomalías de éstos últimos para el área ecológica Estepa Magallánica Seca.

Metodología

Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada al sur de la provincia de Santa Cruz (Patagonia), en el área ecológica Estepa Magallánica Seca y su continuidad del lado chileno. Esta es una de las áreas más productivas de la provincia desde el punto de vista ganadero. Se caracteriza por tener temperaturas promedios anuales entre 6° y 7°C y precipitaciones promedios anuales entre 200 y 300 mm (Almonacid et al., 2021, **En prensa**; Oliva et al., 2001). La vegetación está conformada por estepas gramíneas con dominancia de *Festuca gracillima*, algunos pastos cortos y puede presentar arbustos aislados.

Datos

Dentro del área de estudio se encuentran 4 estaciones meteorológicas (Figura 2). Los datos de éstas fueron obtenidos de distintas fuentes (Dirección Meteorológica de Chile; INTA; Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica; Servicio Meteorológico Nacional: Dirección General de Aguas de Chile), seleccionándose solo aquellas que tienen series completas de datos de precipitación desde el año 2000 al 2019. Los datos faltantes de temperatura fueron completados usando distintas técnicas estadísticas (Allen et al, 2006; Toro Trujillo et al, 2015; WMO, 1983). Los resultados corresponden a un recorte de las series de datos de 20 años con la finalidad de hacerlos coincidir con los datos obtenidos desde las imágenes satelitales, aunque para el cálculo de los índices de sequías AP, SPI y SPEI se utilizaron series más prolongadas para mejorar su confiabilidad. Los mismos se calcularon en diferentes escalas temporales (1, 3, 6 y 12 meses).

Se trabajó con el producto MOD13Q1.006 (índices de vegetación, 250m, 16 días) del sensor MODIS Terra (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Para extraer la información se generaron polígonos adyacentes a cada estación con una superficie igual o mayor a 3 píxeles de las imágenes empleadas, evitando áreas antropizadas. Los datos fueron obtenidos utilizando la plataforma *Google Earth Engine*, empleando la banda “*SummaryQA*” para seleccionar sólo los píxeles de buena calidad. Además de utilizar las bandas de NDVI y EVI, se utilizaron las otras bandas para calcular otros índices: NDWI y NDDI. A partir de los índices espectrales, se calcularon anomalías para cada uno (ANDVI, AEVI, ANDWI y ANDDI).

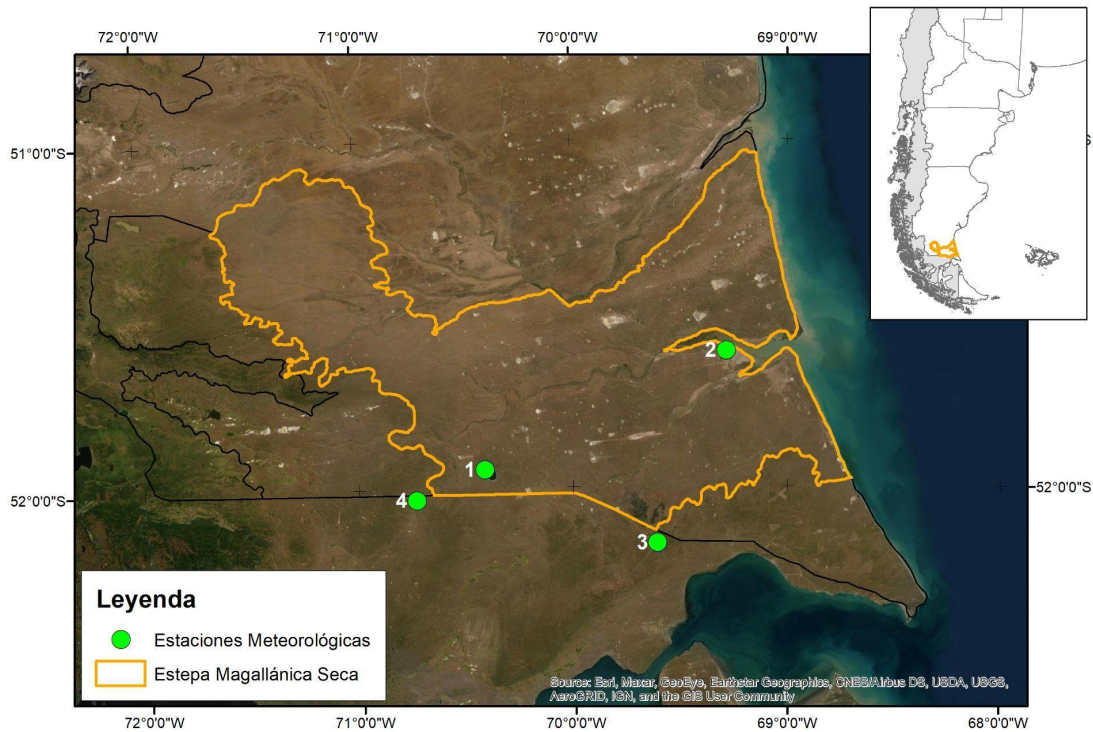


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio y de estaciones meteorológicas. Lugares de las estaciones meteorológicas: 1. Potrok Aike (INTA), 2. Río Gallegos (SMN), 3. Monte Aymond (DGA) y 4. Teniente Merino (DGA).

En la Tabla 1, se explicitan las categorías para cuantificar el exceso o déficit de agua según el tipo de índice considerado.

Tabla 1: Clasificación de las sequías utilizando los diferentes índices

CATEGORIAS	Índices meteorológicos	Índices espectrales		
	SPI – AP – SPEI	ANDVI	NDDI	NDWI
Normal o sin sequía	$\geq 0,00$	$\geq 0,00$	$\leq 0,20$	$\geq 0,40$
Ligeramente seco	$(-1,00 ; 0,00)$	$(-1,00 ; 0,00)$	$(0,20 ; 0,30]$	$[0,30 ; 0,40)$
Sequía moderada	$(-1,50 ; -1,00]$	$(-1,50 ; -1,00]$	$(0,30 ; 0,40]$	$[0,20 ; 0,30)$
Sequía severa	$(-2,00 ; -1,50]$	$(-2,00 ; -1,50]$	$(0,40 ; 0,50]$	$[0,00 ; 0,20)$
Sequía extrema	$\leq -2,00$	$\leq -2,00$	$\geq 0,50$	$< 0,00$

Donde: SPI (Índice Estandarizado de Precipitación), AP (Anomalía de Precipitaciones), SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación -Evapotranspiración), ANDVI (Anomalía del Índice de Vegetación Normalizado), NDDI (Índice de Sequía Normalizado) y NDWI (Índice de Agua Normalizado)

Se estudiaron las correlaciones entre los distintos conjuntos de índices: meteorológicos, índices espectrales, anomalías de los índices espectrales. Todo el análisis se realizó utilizando el software R (r-project.org).

Resultados preliminares

En la Tabla 2 se presentan algunas correlaciones entre las variables consideradas.

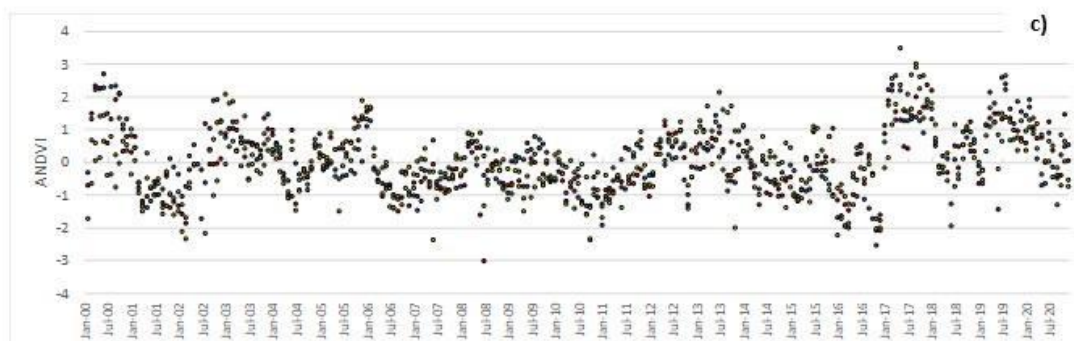
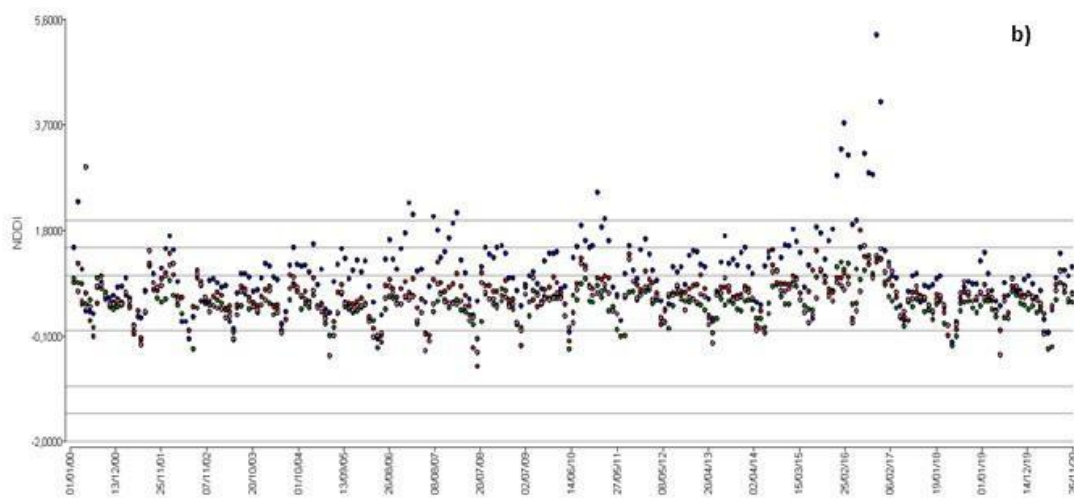
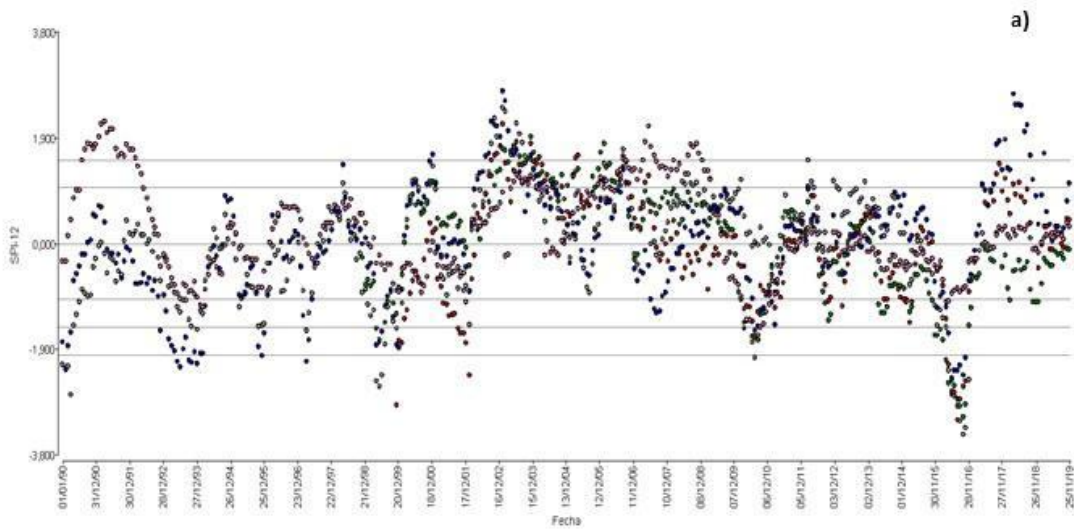
Tabla 2: Correlaciones para AP, SPI, SPEI, NDVI, EVI, NDWI, NDWI y las anomalías de NDWI y NDDI

<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SPI-1</th> <th>SPEI-1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>AP-1</th> <td>0,95</td> <td>0,89</td> </tr> <tr> <th>SPI-1</th> <td></td> <td>0,89</td> </tr> </tbody> </table>				SPI-1	SPEI-1	AP-1	0,95	0,89	SPI-1		0,89	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SPI-3</th> <th>SPEI-3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>AP-3</th> <td>0,98</td> <td>0,91</td> </tr> <tr> <th>SPI-3</th> <td></td> <td>0,90</td> </tr> </tbody> </table>				SPI-3	SPEI-3	AP-3	0,98	0,91	SPI-3		0,90	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SPI-6</th> <th>SPEI-6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>AP-6</th> <td>0,98</td> <td>0,90</td> </tr> <tr> <th>SPI-6</th> <td></td> <td>0,89</td> </tr> </tbody> </table>				SPI-6	SPEI-6	AP-6	0,98	0,90	SPI-6		0,89
	SPI-1	SPEI-1																																	
AP-1	0,95	0,89																																	
SPI-1		0,89																																	
	SPI-3	SPEI-3																																	
AP-3	0,98	0,91																																	
SPI-3		0,90																																	
	SPI-6	SPEI-6																																	
AP-6	0,98	0,90																																	
SPI-6		0,89																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SPI-12</th> <th>SPEI-12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>AP-12</th> <td>0,99</td> <td>0,90</td> </tr> <tr> <th>SPI-12</th> <td></td> <td>0,90</td> </tr> </tbody> </table>				SPI-12	SPEI-12	AP-12	0,99	0,90	SPI-12		0,90	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>ANDWI</th> <th>ANDDI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>SPI-12</th> <td>0,53</td> <td>-0,55</td> </tr> <tr> <th>ANDWI</th> <td></td> <td>-0,94</td> </tr> </tbody> </table>				ANDWI	ANDDI	SPI-12	0,53	-0,55	ANDWI		-0,94	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NDWI</th> <th>NDVI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>NDDI</th> <td>-0,95</td> <td></td> </tr> <tr> <th>EVI</th> <td></td> <td>0,82</td> </tr> </tbody> </table>				NDWI	NDVI	NDDI	-0,95		EVI		0,82
	SPI-12	SPEI-12																																	
AP-12	0,99	0,90																																	
SPI-12		0,90																																	
	ANDWI	ANDDI																																	
SPI-12	0,53	-0,55																																	
ANDWI		-0,94																																	
	NDWI	NDVI																																	
NDDI	-0,95																																		
EVI		0,82																																	

Donde: SPI (Índice Estandarizado de Precipitación), AP (Anomalía de Precipitaciones), SPEI (Índice Estandarizado de Precipitación -Evapotranspiración), NDVI (Índice de Vegetación Normalizado), EVI (Índice de Vegetación Mejorada), NDWI (Índice de Agua Normalizado), ANDDI (Anomalía del Índice de Sequía Normalizado) y ANDWI (Anomalía de Índice de Agua Normalizado). Para AP, SPI y SPEI -k indica la escala temporal para el cálculo del índice, y la letra A delante del nombre de NDWI, NDVD indica que es la anomalía correspondiente al índice espectral.

Se observa que los índices de sequía a partir de datos meteorológicos (AP, SPI, SPEI) están altamente correlacionados para las distintas escalas temporales consideradas (n=1, 3, 6, 12). Además, ANDWI y ANDDI están altamente correlacionadas de manera negativa.

El SPI de 12 meses (SPI12), el NDDI y ANDVI muestran los eventos de sequía agropecuarias más importantes observados en la zona en las últimas décadas, por ejemplo, para los años 2006, 2007, 2011 y 2016 (Figura 3). Estas coinciden con las declaraciones de emergencias agropecuarias en la zona (AFIP). En todas las estaciones se evidencia el mismo comportamiento temporal, aunque con distinta intensidad. El SPI12 fue correlacionado moderada y positivamente con ANDWI (0.53) y moderada y negativamente con ANDDI (-0.55).



● POTROK AIKE INTA ● RIO GALLEGOS AERO ● MONTE AYMOND ● TENIENTE MERINO

Figura 3. Evolución temporal de índices de sequía para las series analizadas: a) SPI de 12, b) NDDI y c) ANDVI.

Las diferentes estaciones mostraron distintas relaciones entre estas variables. Esto puede deberse a que, a pesar de estar en una misma área homogénea, la Estepa Magallánica Seca, presenta heterogeneidad en su vegetación (Schenkel et al., 2021) y en la precipitación.

Las sequías son eventos relativamente complejos, donde participan diferentes fenómenos ambientales. En posteriores análisis se incorporarán otras variables asociadas a sequías obtenidas de sensores remotos, como el contenido hídrico en suelo y la temperatura superficial.

Referencias bibliográficas

- AFIP. Biblioteca Electrónica | AFIP - Administración Federal de Ingresos Públicos. Recuperado 16 de julio de 2021, de <http://biblioteca.afip.gob.ar/cuadroslegislativos/cuadroLegislativo.aspx?i=219>
- Allen, R. G., Pereira, L.S. & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo – Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riesgo y drenaje. 56: 227-240.
- Almonacid, L., Pessacg, N., Diaz, B., Bonfilii, O., & Peri, P. L. (2021). Nueva base de datos reticulada de precipitación para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Meteorológica*, 46(2), 28-54.
- Almonacid, L., Pessacg, N., Diaz, B., Bonfilii, O., & Peri, P. L. (En prensa). Nueva base de datos reticulada de temperatura para la provincia de Santa Cruz, Argentina. 37.
- Dirección General de Aguas de Chile. . Recuperado 16 de julio de 2021, de <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>
- Dirección Meteorológica de Chile. Portal de Servicios Climáticos—Dirección Meteorológica de Chile. Recuperado 16 de julio de 2021, de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/>
- Fonnegra Mora, D. (2017). Desarrollo de un sistema operativo para el cálculo de índices de sequía basados en información espacial [Universidad nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/5991>
- Gao, B. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257-266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Gillette, H. P. (1950). A Creeping Drought under Way. *Water and Sewage Works*, 104-105.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6). <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- INTA. Sistema de Información Patagonia Sur. Recuperado 16 de julio de 2021, de <http://sipas.inta.gob.ar/>
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621-636.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. 6.
- NDMC -National Drought Mitigation Center. (2020). Types of Drought. <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx>

- Oliva, G., González, L., Rial, P., & Livraghi, E. (2001). Áreas ecológicas de Santa Cruz y Tierra del Fuego. En *Ganadería Ovina Sustentable en la Patagonia Austral*. Tecnología de Manejo Extensivo (pp. 41-82).
- Organización de las Naciones Unidas. (1994). Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África. <https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-01/Spanish.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial. (2006). Vigilancia y alerta temprana de la sequía: Conceptos, progresos y desafíos futuros. Organización Meteorológica Mundial.
- Rouse Jr, J. W., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. En *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: Volumen 2: Technical presentations section A* (Stanley C. Freden, Enrico P. Mercanti, Margaret A. Becker, pp. 309-317).
- Schenkel, C. A., Oliva, G. E., Paredes, P. N., Humano, G., & Ferrante, D. (2021). Cartografía de un nuevo Modelo de Estados y Transiciones de la Estepa Magallánica Seca en la Patagonia argentina. *Ecología Austral*, 31, 301-315.
- Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica. Sistema Nacional de Información Hídrica. Argentina.gob.ar. Recuperado 16 de julio de 2021, de <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>
- Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado 16 de julio de 2021, de <https://www.smn.gob.ar/>
- Soto, J., Paredes, P., Maglione, D., Sandoval, M., & Bonfili, O. (2020). Comportamiento de la vegetación a partir del índice verde y datos climáticos en dos sitios de la Patagonia Austral. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 12(4), 17-31. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v12.n4.751>
- Toro Trujillo A.M., Arteaga Ramírez R., Vázquez Peña M.A. & Ibáñez Castillo L. (2015). Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(2): 577-588
- Vaiman, N. (2018). Comparación de índices climáticos y espectrales en la estimación de rendimiento de maíz y soja a nivel departamental en Entre Ríos [Info:ar-repo/semantics/tesis de maestría, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires]. <http://repositorio.inta.gob.ar:80/handle/20.500.12123/6151>
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International - WATER INT*, 10, 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- WMO (1983). *Guide to climatological practices*. WMO-No100. Ginebra, Suiza. 180 p.