

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

Paula Paredes <sup>1,2</sup>; Dora Maglione <sup>2</sup>; Marisa Sandoval <sup>2</sup>; Julio Soto <sup>2</sup>; Oscar Bonfili <sup>3</sup>; Gervasio Humano <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Estación Experimental Agropecuaria Santa Cruz. Correo postal: INTA. EEA Santa Cruz, Mahatma Gandhi 1322.CP 9400. Río Gallegos, Santa Cruz.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de la Patagonia Austral- Unidad Académica Río Gallegos. Av. Gregores y Piloto "Lero" Rivera. CP 9400. Río Gallegos, Santa Cruz.

<sup>3</sup>Servicio Meteorológico Nacional. Oficina Río Gallegos. Aeropuerto Internacional Piloto Civil Norberto Fernández, Ruta Nacional 3 km 8. CP 9400. Río Gallegos, Santa Cruz.

*paredes.paula@inta.gob.ar*

### Resumen

Recibido: 12/2021

Aceptado: 04/2022

#### Palabras clave

SPI - NDVI - NDWI –  
NDDI.

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 *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - MODIS (Índice Normalizado de Sequía- NDDI, Índice Normalizado de Agua- NDWI, Índice Normalizado de Vegetación- NDVI, Índice de Vegetación Mejorado- EVI) y anomalías de estos 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.

Copyright: Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires.

ISSN: 2250-687X - ISSN (En línea): 2250-6861

## RELATIONSHIP BETWEEN DROUGHT INDEXES OF THE DRY MAGELLANIC STEPPE (PATAGONIA, ARGENTINA) USING METEOROLOGICAL AND SATELLITE DATA

Paula Paredes <sup>1,2</sup>; Dora Maglione <sup>2</sup>; Marisa Sandoval <sup>2</sup>; Julio Soto <sup>2</sup>; Oscar Bonfili <sup>3</sup>; Gervasio Humano <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Estación Experimental Agropecuaria Santa Cruz. Correo postal: INTA. EEA Santa Cruz, Mahatma Gandhi 1322.CP 9400. Río Gallegos, Santa Cruz.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de la Patagonia Austral- Unidad Académica Río Gallegos. Av. Gregores y Piloto "Lero" Rivera. CP 9400. Río Gallegos, Santa Cruz.

<sup>3</sup>Servicio Meteorológico Nacional. Oficina Río Gallegos. Aeropuerto Internacional Piloto Civil Norberto Fernández, Ruta Nacional 3 km 8. CP 9400. Río Gallegos, Santa Cruz.

*paredes.paula@inta.gob.ar*

### Abstract

#### KEYWORDS

SPI - NDVI - NDWI –  
NDDI.

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 behavior 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-*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer 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.

Copyright: Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires.

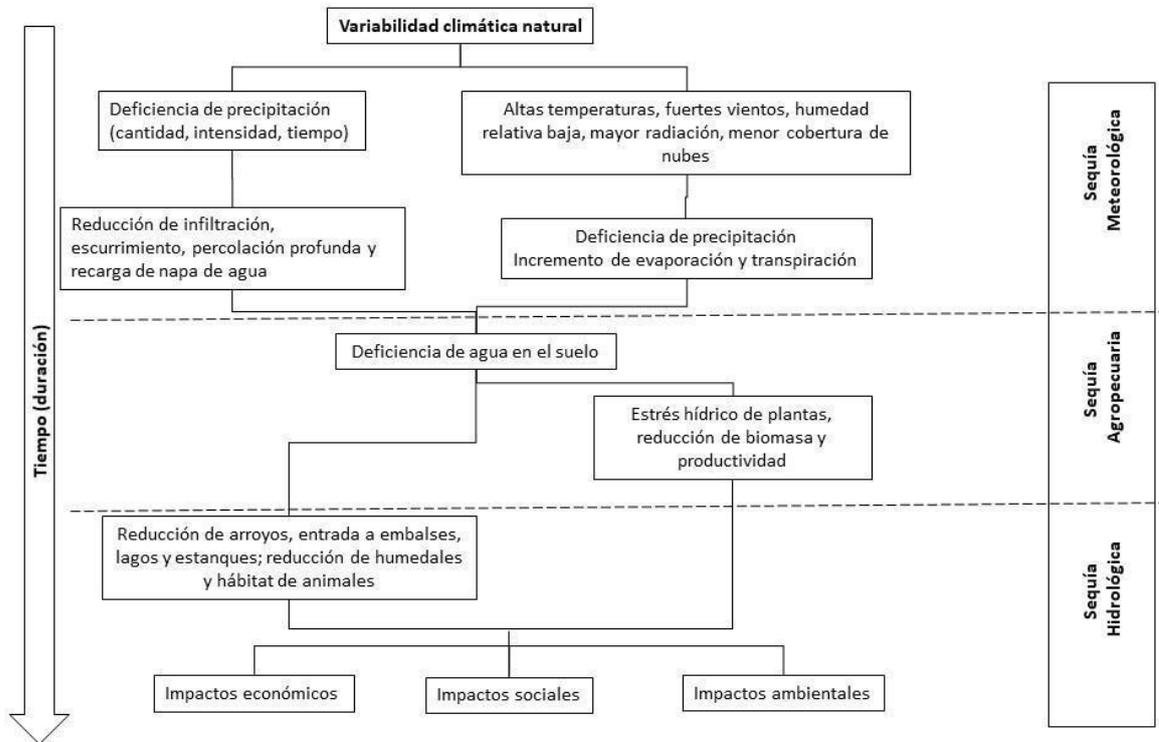
ISSN: 2250-687X - ISSN (En línea): 2250-6861

## 1. INTRODUCCIÓN

Históricamente, la sequía ha sido uno de los “desastres” que más ha afectado a la actividad agrícola y al bienestar de la sociedad (Loaiza Cerón, Carvajal Escobar & Baquero Montoya, 2015). Desde tiempos remotos las comunidades tomaron conciencia del vínculo estrecho que existe entre los sistemas productivos agropecuarios y las condiciones meteorológicas. 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); aún sequías débiles tienen graves repercusiones en el sector rural de los países (Kallis, 2008). Un denominador común en relación a las muchas definiciones dadas de sequía (UNCCD, 1994; Organización Meteorológica Mundial, 2006), 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 sequía a partir de su origen y los efectos que produce: meteorológica (relacionada al grado de desviación de la precipitación en comparación con un comportamiento “normal” de una serie de tiempo de precipitaciones preestablecida), agrícola (que está relacionada a la anterior y al impacto en los cultivos, ocurre cuando el agua no coincide con las épocas en que las necesidades agropecuarias lo exigen), hidrológica (relacionada con 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)



Fuente: Traducción propia de MDCM (s/f), “Sequence of drought occurrence and impacts for commonly accepted drought types. All droughts originate from a deficiency of precipitation or meteorological drought but other types of drought and impacts cascade from this deficiency”

Existen autores que caracterizan las sequías meteorológicas utilizando índices meteorológicos (Loaiza Cerón et al., 2015; Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno, 2010). Sin embargo, la escasa y desigual distribución de pluviómetros limita el acceso fiable y a largo plazo basado en mediciones de tierra. Además, la precipitación presenta gran variación espacio-temporal y alta incertidumbre debido a la diferencia de la presión del aire y la temperatura, por lo que la interpolación espacio-temporal no siempre puede capturar con precisión la dinámica de los datos de precipitación. Los avances de la teledetección realizados en las últimas décadas han incrementado notoriamente la capacidad de obtener información periódica y global sobre la cantidad de agua presente en el suelo (McCabe et al, 2017), lo cual implica obtener en forma indirecta la cantidad de precipitación caída. A partir de este tipo de información, existen estudios que incluyen el pronóstico del tiempo y el clima, el seguimiento de la sequía y los incendios forestales, el seguimiento de las inundaciones y deslizamientos de tierra y una mayor productividad agrícola (Eswar et al., 2018; Sazib, Mladenova & Bolten, 2018). Por lo que en este contexto el desarrollo de las técnicas de teledetección son una alternativa que enriquece los datos de precipitación en diferentes resoluciones, tanto espaciales como temporales. Desde hace décadas existen trabajos que han relacionado exitosamente datos meteorológicos de terreno con los

obtenidos de imágenes satelitales (Fonnegra Mora, 2017; Soto, Paredes, Maglione, Sandoval & Bonfili, 2020; Vaiman, 2018); y cada vez hay más estudios que comparan índices calculados desde estas dos fuentes (Lu, Jia, Menenti, Yan, Zheng, & Zhou, 2018; Zhu, Louo, Zhou, Xu, Wang & Gao, 2019) y productos de precipitación usando sensores han sido utilizados para monitorear sequías en muchos lugares del mundo (Lessel, Sweeney & Ceccato, 2016; Wang, Yang, Wang, Zhang & Li, 2019). Los datos meteorológicos son una fuente confiable de información para estudiar estos fenómenos, pero 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, por lo que una alternativa para cubrir estas falencias es utilizar sensores remotos, que tienen la ventaja de cubrir grandes áreas a bajo costo.

Para monitorear y evaluar sequías se utilizan indicadores o índices. Estos últimos, generalmente calculados a partir de datos meteorológicos o hidrometeorológicos, aunque existen índices híbridos. 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, Doesken & Kleist, 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 distintos tipos de sequía, en particular las obtenidas usando la escala de 6 y 12 meses que están vinculadas con la sequía agropecuaria.

El SPI y el SPEI representan la desviación estándar de la precipitación caída respecto de la media, en el período de acumulación de que se trate, una vez que la distribución original de la precipitación (en el primer caso se utiliza una gamma y en el segundo una log logística) ha sido transformada en una distribución normal estándar, donde los valores positivos indican una precipitación superior a la media y los valores negativos una precipitación inferior a la media. Ambos resultan ser una valiosa herramienta para la determinación de la intensidad y duración de diferentes sequías, aunque se requiere un período mínimo de registros de datos de 30 años.

A partir de datos satelitales es posible calcular índices relacionados con la condición de la vegetación, como el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*, Rouse Jr, Hass, Schell & Deering, 1974), el Índice de Vegetación Mejorado (EVI, *Enhanced vegetation index*, Liu & Huete, 1995), el Índice de Agua Normalizado (NDWI, *Normalized Difference Water Index*, Gao, 1996), el Índice Normalizado de Sequías (NDDI, *Normalized Difference Drought Index*, Gu, Brown, Verdin & Wardlow, 2007), el Índice de Condición De la Vegetación (VCI, *Vegetation Condition Index*, Kogan, 1995), entre otros, los cuales permiten evaluar y monitorear sequías (Gu et al., 2007; Kogan, 1997). Algunos de ellos se calculan utilizando diferentes bandas de las imágenes, mientras otros se calculan empleando otros índices. Los índices de vegetación están asociados a la cantidad de material verde de la vegetación y su estado. Así, el NDVI, uno de los más utilizados en la bibliografía, utiliza las bandas de Infrarrojo Cercano (IRC) y Rojo (R) tomando valores entre -1 y 1, donde los negativos pueden estar asociados al agua, los cercanos a 0 a superficies escasamente vegetadas y los cercanos a 1 a vegetación densa y vigorosa. El EVI es similar, adicionando la banda en la zona del Azul (A), incorporando, además, correcciones y ajustes atmosféricos y de suelo. En tanto el NDWI, utiliza las bandas IRC e Infrarrojo de Onda Corta (SWIR), aunque existen diferentes variantes dependiendo de las longitudes de onda empleadas y del satélite usado. Está asociado al contenido hídrico de la planta y del suelo, indicando con valores entre -1 a 0 desde áreas sin vegetación a estrés hídrico, y con valores más altos un mayor contenido de agua. El índice NDDI utiliza en su cálculo dos de los índices anteriores (NDVI y NDWI), donde los valores más altos están vinculados a sequías. El VCI utiliza el NDVI, y lo compara con su máximo y mínimo absoluto, y también permite detectar, monitorear y evaluar condiciones de sequías en la vegetación.

El cálculo de la anomalía de una variable permite detectar desviaciones respecto de un comportamiento considerado como normal (que corresponde al valor 0). El estudio de su serie a través del tiempo, posibilita detectar periodos que se encuentran por debajo o por arriba de la media, y también la intensidad con la que el mismo se manifiesta, siendo un indicador útil en el estudio del comportamiento de la variable a través del tiempo. Además, si el mismo está normalizado resulta ser adimensional por lo que permite comparar comportamientos en distintas localizaciones. El término ha sido utilizado para estudio de anomalías climáticas (Wilks, 2011), pero se utiliza su adaptación a otros índices, por ejemplo, el NDVI. La ANDVI (Anomalía de NDVI) es utilizada ampliamente para detectar y monitorear sequías, dado que permite observar cambios en la actividad fotosintética de un período respecto de su comportamiento normal.

El objetivo del presente trabajo es 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 estos últimos para el área ecológica Estepa Magallánica Seca.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada al sur de la provincia de Santa Cruz perteneciente a la región Patagónica, en el área ecológica Estepa Magallánica Seca y su continuidad del lado chileno (Figura 2). Esta es una de las áreas más productivas de la provincia desde el punto de vista ganadero. Se caracteriza por tener temperaturas promedias anuales entre 6° y 7°C y precipitaciones promedias anuales entre 200 y 300 mm (Almonacid, Pessacg, Díaz, Bonfilí, & Peri, 2021; Oliva, González, Rial & Livraghi, 2001), distribuidas a lo largo de todo el año, con un máximo de precipitación en diciembre-febrero y otro secundario de menor intensidad en los meses de abril y mayo. Es importante aclarar que estos dos máximos (principal y secundario) tienen distintas características. En el principal, que ocurre durante la época estival (diciembre-enero-febrero), se presentan generalmente precipitaciones en forma de chaparrones o (en menor escala) aguaceros. Durante el comienzo del otoño, la combinación de comportamientos estivales (todavía presentes) y el comienzo de pasajes cada vez más periódicos de masa polares o subpolares sobre el área, cambia las características de las precipitaciones. Al sumarse algunos episodios de aguaceros esporádicos, dan lugar al máximo secundario. Las precipitaciones de invierno, compuestas por lluvia y nieve, son importantes para recargar el perfil del suelo que será utilizado por las plantas en primavera.

La vegetación está conformada, en gran parte de la Estepa Magallánica Seca, por estepas gramíneas, con coberturas vegetales que varían entre 50 y 60%. En general la especie dominante es coirón fueguino (*Festuca gracillima*), pero también presenta pastos cortos y en algunos casos arbustos aislados. A pesar de que es un área homogénea, al cambiar de escala, puede observarse heterogeneidad en cuanto a la cobertura vegetal y especies presentes. Esta variación está asociada al grado de degradación. En lugares con acumulación de arenas aumenta la presencia de especies psamófilas, como la *Pappostipa chrysophylla*, y en las áreas de pérdida de suelo, aumenta la cobertura de subarbustos del género *Nardophyllum*.

Dentro del área de estudio se encuentran 4 estaciones meteorológicas seleccionadas por contar con series completas de datos de precipitación desde el año 2000 al 2019 (Figura 2). Las estaciones de Potrok Aike y Río Gallegos se encuentran dentro de la Estepa Magallánica Seca, y Teniente Merino y Monte Aymond en una zona de transición, pero con condiciones ambientales similares. Los datos de éstas fueron obtenidos de distintas fuentes (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA; Servicio Meteorológico Nacional - SMN; Dirección General de Aguas de Chile - DGA). Las series de temperatura contaban con datos faltantes, por lo que se emplearon distintas técnicas estadísticas para completarlos, como análisis de regresión con estaciones correlacionadas, modelación temporal, promedios para la misma unidad temporal, entre otros

(Allen, Pereira, Raes & Smith, 2006; Toro Trujillo, Arteaga Ramirez, Vázquez Peña & Ibañez Castillo, 2015; WMO, 2018), las cuales fueron comparadas para seleccionar el mejor procedimiento para cada estación, mediante distintas medidas de error (Maglione et al, 2019). 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 utilizadas en este trabajo, aunque para el cálculo de los índices de sequías AP, SPI y SPEI, se utilizaron series más prolongadas para mejorar su confiabilidad. Estos últimos se calcularon para diferentes escalas temporales (1, 3, 6 y 12 meses).

Para el cálculo de AP, se trabajó con la serie de precipitaciones, las medias  $u_p$  y desvíos estándares  $s_p$  para cada unidad temporal y a partir de éstas se calculó el valor del índice AP según la ecuación (1)

$$AP = (x - u_p) / s_p \quad (1)$$

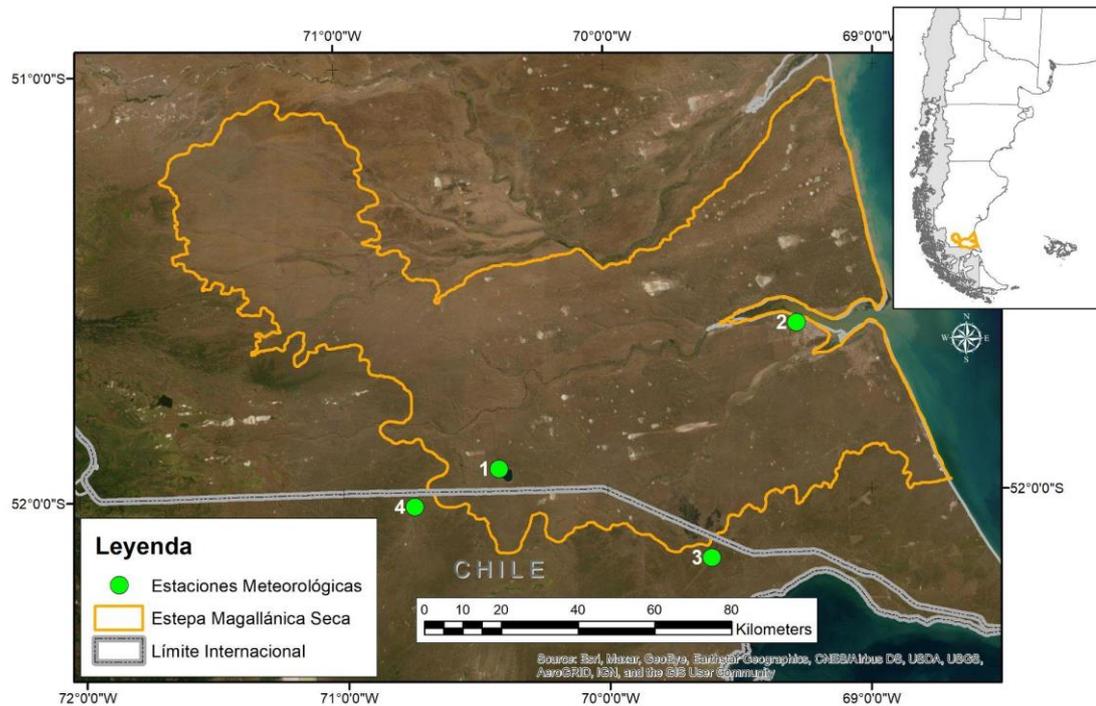
donde  $p$  representa la unidad de tiempo seleccionada.

Para el cálculo de SPI se ajustó una distribución gamma para las series temporales de precipitación a partir de cada periodo requerido, y posteriormente se estandarizó a una distribución normal, de esta manera para el lugar y el periodo seleccionados el valor medio de la precipitación corresponde al valor 0 del índice.

Para el SPEI se incorporó el efecto de la evapotranspiración, calculada a partir de la ecuación de Thornthwaite (1948), para su cálculo se utilizaron las series de precipitaciones, temperaturas y la latitud de cada localización usando para el ajuste una distribución teórica log-logística.

Dadas las características de alta resolución temporal, espectral, calidad de las imágenes y resolución espacial, se trabajó con el producto MOD13Q1.006 *Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m* del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) correspondiente a la plataforma Terra (*Earth Observing System*, Terra (am-1)). Este producto contiene el cálculo de índices de vegetación compuestos de 16 días, con una resolución espacial de 250 m y se encuentran disponibles desde febrero del 2000. 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, promedio por polígono, fueron obtenidos utilizando la plataforma *Google Earth Engine*, empleando la banda “*SummaryQA*” para seleccionar sólo los píxeles de buena calidad, evitando aquellos con datos marginales, cubiertos de nieve, hielo o nubes. Además de utilizar las bandas de NDVI y EVI, se emplearon las otras bandas para calcular los índices NDWI y NDDI (ecuaciones 2 y 3).

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).



Fuente: Elaboración propia en base a IGN (límites interprovinciales), ESRI (imagen Geoeye), INTA (Límite Estepa Magallánica Seca)

- El NDWI, Gao (1996) utiliza en su cálculo las bandas del IRC, centradas en 860 nm, y SWIR, en 1240 nm. Existen modificaciones a este índice empleando otras longitudes de onda (McFeeters, 1996; Xu, 2006). Para este trabajo se utilizó:

$$NDWI = (IRC - IRM) / (IRC + IRM) \quad (2)$$

Donde, en el caso del producto MOD13Q1, la banda IRC está centrada en 858 nm y el Infrarrojo Medio (IRM) en 2130 nm

- El NDDI se calculó como la diferencia normalizada de NDVI y NDWI:

$$NDDI = (NDVI - NDWI) / (NDVI + NDWI) \quad (3)$$

A partir de los valores de NDDI, NDWI, NDVI y EVI, se calcularon sus anomalías (ANDDI, ANDWI, ANDVI, AEVI) utilizando la transformación que  $(x - \mu) / \sigma$  donde  $x$  es la variable considerada,  $\mu$  corresponde a la media de esa serie y  $\sigma$  a su desvío estándar.

Los índices de sequía son clasificados para representar diferentes intensidades. En la Tabla 1, se explicitan solo las categorías para cuantificar el déficit de agua según el tipo de índice considerado, no mostrándose las clases de “exceso” hídrico.

Tabla 1: Clasificación de las sequías utilizando los diferentes índices

CATEGORÍAS	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	$\leq -2,00$	$\leq -2,00$	$\geq 0,50$	$< 0,00$

Fuente: Elaboración propia

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 tanto en cada localización como de manera general. Todo el análisis se realizó utilizando el software R (r-project.org).

### 3. RESULTADOS

Considerando los índices calculados desde las variables meteorológicas, se observa que los índices de sequía a partir de datos meteorológicos (AP, SPI, SPEI) están altamente correlacionados para las distintas escalas temporales consideradas ( $n=1, 3, 6, 12$ ) en forma general (Tabla 2). De manera local, las correlaciones entre AP y SPI son superiores a 0,95 en todas las ubicaciones, aunque las calculadas entre SPEI y los otros dos índices son un poco inferiores, pero siguen siendo altas (Tabla 3)

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

	SPI-1	SPEI-1		SPI-3	SPEI-3		SPI-6	SPEI-6
AP-1	0,95	0,89	AP-3	0,98	0,91	AP-6	0,98	0,90
SPI-1		0,89	SPI-3		0,90	SPI-6		0,89

	SPI-12	SPEI-12		ANDWI	ANDDI		NDWI	NDVI
AP-12	0,99	0,90	SPI-12	0,53	-0,55	NDDI	-0,95	
SPI-12		0,90	ANDWI		-0,94	EVI		0,82

Fuente: Elaboración propia

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 Mejorado), 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, NDVI indica que es la anomalía correspondiente al índice espectral.

Tabla 3: Correlaciones entre índices meteorológicos en cada estación meteorológica.

	AP - SPI				AP - SPEI				SPI - SPEI			
	n=1	n=3	n=6	n=12	n=1	n=3	n=6	n=12	n=1	n=3	n=6	n=12
PA	0,95	0,99	0,99	0,99	0,84	0,85	0,83	0,80	0,82	0,85	0,82	0,79
RG	0,95	0,98	0,99	0,99	0,92	0,92	0,93	0,93	0,91	0,93	0,92	0,93
MA	0,97	0,98	0,99	0,99	0,92	0,93	0,91	0,92	0,93	0,92	0,91	0,91
TM	0,95	0,95	0,96	0,99	0,88	0,92	0,95	0,97	0,92	0,91	0,93	0,97

Fuente: Elaboración propia

Donde: PA= Potrok Aike, RG= Río Gallegos, MA= Monte Aymond y TM= Teniente Merino.

De la Tabla 4, se deduce que, para las variables espectrales, analizadas por estaciones, las correlaciones entre EVI y NDVI son altas y positivas. Mientras que existe una correlación muy alta y negativa entre NDDI y NDWI, al igual que entre las anomalías de estos índices.

Tabla 4: Correlaciones entre índices espectrales y sus anomalías en cada estación meteorológica

	Correlaciones entre			
	EVI - NDVI	NDWI - NDDI	AEVI - ANDVI	ANDWI - ANDDI
PA	0,85	-0,96	0,81	-0,96
RG	0,75	-0,86	0,86	-0,90
MA	0,90	-0,96	0,83	-0,96
TM	0,88	-0,92	0,78	-0,94

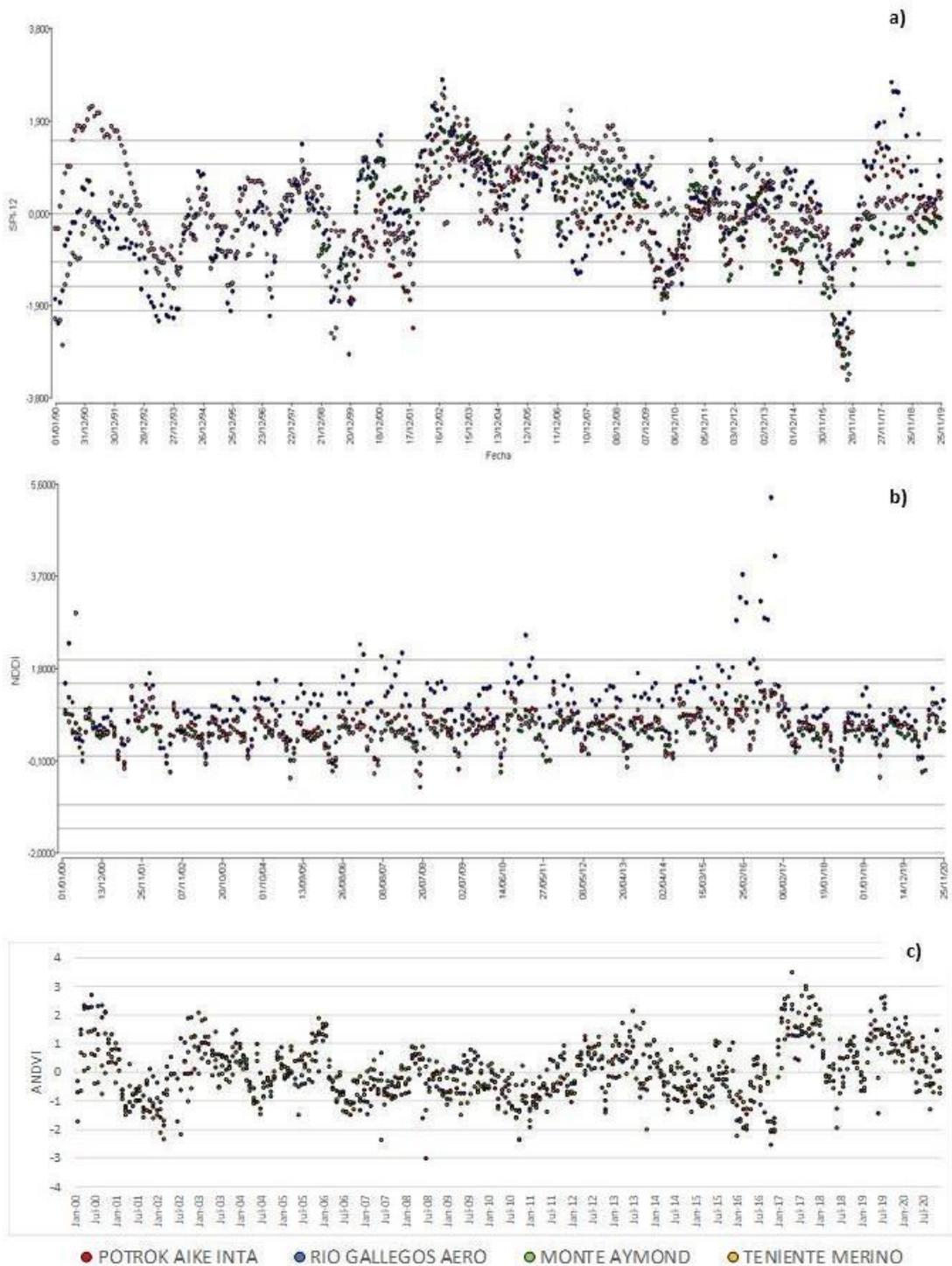
Fuente: Elaboración propia

Donde: PA= *Potrok Aike*, RG= *Río Gallegos*, MA= *Monte Aymond* y TM= *Teniente Merino*.

Al comparar índices meteorológicos y espectrales, las correlaciones resultan ser muy bajas, bajas y moderadas en general. El SPI-12 fue correlacionado moderada y positivamente con ANDWI ( $r=0,53$ ) y moderada y negativamente con ANDDI ( $r=-0,55$ ), siendo la localidad de Río Gallegos la única en que estas correlaciones resultan ser mayores ( $r=0,73$  para SPI-12 y ANDWI y  $r=-0,68$  para SPI-12 y ANDDI).

En la Figura 3 se grafican las series de SPI de 12 meses (SPI-12), el NDDI y ANDVI para los cuatro sitios. Se observa en ellos los eventos de sequía agropecuaria más importantes observados en la zona en las últimas décadas (como, por ejemplo, para los años 2001-2002, 2010-2011 y 2016) y también años de exceso de precipitación.

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



Fuente: Elaboración propia.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se obtuvieron índices de sequía, calculados con información de 4 estaciones meteorológicas y de datos espectrales (producto MOD13Q1) para áreas adyacentes a esas ubicaciones. También se calcularon anomalías de estos índices. Se obtuvieron correlaciones entre ellas, tanto para el área de estudio en general, Estepa Magallánica Seca, como para cada estación meteorológica.

El índice SPI ha sido uno de los mejor puntuados en distintos estudios de comparación (Quiring, 2009; Rivera, 2014) y uno de los más utilizados a nivel mundial (Podestá, Skanki, Herrera & Veigal, 2016). En el área bajo estudio las correlaciones entre los índices meteorológicos considerados (AP, SPI, SPEI) resultan ser muy altas, en todas las unidades temporales calculadas, en particular para SPI y SPEI, similar a lo encontrado por Vicente Serrano et al (2009). En el presente trabajo las mayores correlaciones obtenidas fueron entre AP y SPI, tanto de manera general como en cada estación. Ambos índices son simples de calcular y de interpretar y sólo necesitan de las precipitaciones, aunque tienen el inconveniente de requerir series largas, lo cual no resulta ser fácil de obtener en la región patagónica por la escasez de estaciones meteorológicas.

Los índices meteorológicos calculados, con diferentes escalas temporales, permitieron observar los eventos de sequía. Principalmente el índice SPI-12, ha identificado a la sequía del año 2016, como la de mayor duración (de más de un año) y de mayor intensidad, en el área bajo estudio, alcanzando los mínimos valores para el índice en los meses de octubre y noviembre. Otros periodos que se han detectado en varias estaciones meteorológicas (aunque no en todas) son en los años 2001, 2002, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, siendo entre éstas la del 2010 la de mayor duración.

Las correlaciones entre los índices espectrales también resultaron ser altas entre algunos de ellos. Así es el caso de NDDI y NDWI y entre sus anomalías, como también se ha observado en otros estudios (Wgnn & Vmi, 2020). De manera similar, los índices NDVI y EVI están altamente correlacionados (Paredes, 2011).

Los índices de vegetación, y la anomalía de estos, permitieron detectar momentos de sequía. A partir de la evolución temporal de la anomalía del NDVI (ANDVI), se observa que en todas las estaciones se detecta al 2016 como el año de sequía con mayor duración e intensidad, con valores muy bajos para los meses de noviembre y diciembre. Otros años en los que todas las estaciones identifican como de sequías son 2001, inicio de 2002, primavera 2006, primavera de 2010, verano de 2011 y 2015. Por otro lado, al analizar la evolución temporal del NDDI, se observó que todas las estaciones coinciden en que el año 2016 fue el de mayor sequía. Para este índice en particular, sólo un periodo durante primavera de 2015 es identificado por todas las estaciones. Tres identifican también como años de sequía a otoño de 2000, primavera de 2001, verano de 2002, primavera de 2010 y primavera de 2014.

A pesar de que ambos tipos de índices, tanto los meteorológicos como espectrales, permiten observar sequías, la correlación entre ellos fue baja. La calculada entre SPI-12 y ANDVI fue de  $r=0,29$ , la de SPI-12 y NDDI fue  $r=-0,30$  y entre ANDVI y NDDI fue  $r=-0,24$ . Sólo se detectó una correlación moderada entre las anomalías de NDWI (ANDWI) y NDDI (ANDDI) con el índice SPI calculado en escala anual, como también encontraron Wgnn & Vmi (2020), pero para periodos más cortos del SPI. Sin embargo, todos identifican de manera coincidente varios periodos de sequía, principalmente aquellos que coinciden con las declaraciones de emergencias agropecuarias para la zona (Administración Federal de Ingresos Públicos) de la última década. Esto posiblemente se deba a que las sequías agropecuarias, aquellas en las cuales se ve afectada la

vegetación y por lo tanto la ganadería, se pueden calcular con datos meteorológicos considerando un período de 6 a 12 meses. Sin embargo, las imágenes satélites detectan el momento en que la vegetación ya está afectada quizás porque se manifiesta con un pequeño retraso. Esto último, también fue encontrado por otros autores comparando índices espectrales con meteorológicos (Aksoy & Sertel, 2021)

Los índices meteorológicos y los espectrales permitieron observar momentos de sequía. Ambos coincidieron en capturar las sequías más intensas, aquellas que afectaron la actividad fotosintética de la vegetación. Sin embargo, difieren en el tipo de eventos detectados. Mientras los índices meteorológicos captaron más episodios, de distinta duración e intensidad, es decir, detectan tanto las sequías meteorológicas como agropecuarias, los espectrales permitieron observar más específicamente aquellos en los cuales la vegetación se vio afectada. Sin embargo, los valores de las correlaciones entre ellos, para las diferentes estaciones meteorológicas, son aproximadamente iguales, aunque existen algunas diferencias en relación con la intensidad con la que la misma se manifiesta. Posiblemente debido a que, a pesar de estar en una misma área ecológica (la Estepa Magallánica Seca), dentro de ella hay heterogeneidad en la vegetación (Schenkel, Oliva, Paredes, Humano & Ferrante, 2021) y variación en la distribución espacial de las precipitaciones, por su gran superficie (1.7M de has).

Muchos procesos ecológicos están controlados por las características climáticas, entre otros factores, por lo que los datos meteorológicos son ampliamente utilizados para su monitoreo o gestión. En la región patagónica existen algunos inconvenientes en cuanto a la información proveniente de estaciones meteorológicas. Por un lado, existe escasez de estaciones, y por el otro, varias de ellas no poseen series de datos continuos, y abarcan, en general, períodos cortos de observación. Por lo que una opción es utilizar información satelital, donde el cálculo de índices espectrales ofrece una alternativa válida para el monitoreo de sequías en la región. Además, permiten cubrir áreas donde las estaciones no están presentes.

Las sequías son eventos relativamente complejos, donde participan diferentes fenómenos ambientales. Como se expresó anteriormente, los diferentes índices detectaron las sequías más intensas, pero dado que el NDDI considera tanto el verdor de la vegetación como el contenido hídrico del sistema planta-suelo, se podría recomendar, en un principio, su utilización para el monitoreo espacial. Sin embargo, en posteriores análisis, se incorporarán otras variables asociadas a sequías obtenidas de sensores remotos, como el contenido hídrico en suelo y la temperatura superficial. Una vez identificados los mejores indicadores de la sequía en la región se espera avanzar en la modelación espacio-temporal de las series, lo cual permitiría hacer pronósticos a corto plazo.

El monitoreo y la detección temprana de eventos de sequías, podrían ser considerados como una herramienta para la gestión en diferentes ámbitos para tomar medidas que permitan amortiguar pérdidas económicas en la región.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administración Federal de Ingresos Públicos. (s. f.). Biblioteca Electrónica. Recuperado 11 de marzo de 2022, de <http://biblioteca.afip.gob.ar/cuadroslegislativos/cuadroLegislativo.aspx?i=219>
- Aksoy, S., & Sertel, E. (2021, agosto). *Comparison of drought monitoring indices derived from MODIS and CHIRPS data using Google Earth Engine*. Presentado en 9th Global Conference on Global Warming (GCGW-2021), Croacia.

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO*, 56.
- Almonacid, L., Pessacq, N., Diaz, B. G., Bonfili, O., & Peri, P. L. (2021). Nueva base de datos reticulada de precipitación para la provincia de Santa Cruz, Argentina. *Meteorológica*, 46(2), 27-54
- Dirección General de Aguas de Chile. (s. f.). Recuperado 11 de marzo de 2022, de <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>
- Eswar, R., Das, N. N., Poulsen, C., Behrang, A., Swigart, J., Svoboda, M., Entekhabi, D., Yueh, S., Doorn, B., & Entin, J. (2018). SMAP Soil Moisture Change as an Indicator of Drought Conditions. *Remote Sensing*, 10(5), 788. <https://doi.org/10.3390/rs10050788>
- Fonnegra Mora, D. C. (2017). *Desarrollo de un sistema operativo para el cálculo de índices de sequía basados en información espacial* (Maestría, Universidad Nacional de Córdoba). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. Argentina. Recuperado de <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 and Environment*, 58, 257-266.
- Gillete, H. (1950). A creeping drought under way. *Water and Sewage Works*, 104-105.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. D. (2007). *A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States*. <https://doi.org/10.1029/2006gl029127>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (s. f.). Sistema de Información Patagonia Sur. Recuperado 11 de marzo de 2022, de <http://sipas.inta.gob.ar/>
- Kallis, G. (2008). Droughts. *Annual Review of Environment and Resources*, 33(1), 85-118. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.33.081307.123117>
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621-636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
- Lessel, J., Sweeney, A., & Ceccato, P. (2016). An agricultural drought severity index using quasi-climatological anomalies of remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 37, 913-925. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1142689>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457-465. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1995.8746027>
- Loaiza Cerón, W., Carvajal Escobar, Y., & Baquero Montoya, O. (2015). Índice estandarizado de precipitación (SPI) para la caracterización de sequías meteorológicas en la cuenca del río Dagua-Colombia. *Estudios Geográficos*, 76, 557-578. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201520>

- Lu, J., Jia, L., Menenti, M., Yan, Y., Zheng, C., & Zhou, J. (2018). Performance of the Standardized Precipitation Index Based on the TMPA and CMORPH Precipitation Products for Drought Monitoring in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2810163>
- Maglione, D. S., Sáenz, J. L., Soto, J., Talay, C., Sandoval, M., Bonfili, O., & Llancalahuen, M. (2019). Caracterización de variables climatológicas en la Provincia de Santa Cruz. En M. Arpes (Ed.), *Investigaciones Científicas en el Extremo Austral* (pp. 193-207). Ediciones UNPAedita.
- McCabe, M. F., Rodell, M., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., Lucieer, A., Houborg, R., Verhoest, N. E. C., Franz, T. E., Shi, J., Gao, H., & Wood, E. F. (2017). The future of Earth observation in hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(7), 3879-3914. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3879-2017>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, enero). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. 17-22. Anaheim, California.
- NDMC. (s. f.). Types of Drought. Recuperado 11 de marzo de 2022, de NDMC | National Drought Mitigation Center. University of Nebraska website: <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx>
- Oliva, G., González, L., Rial, P., & Livraghi, E. (2001). Cap. 2. Áreas ecológicas de Santa Cruz y Tierra del Fuego. En P. Borrelli & G. Oliva (Eds.), *Ganadería ovina sustentable en la Patagonia Austral. Tecnología de Manejo Extensivo* (pp. 38-80). Buenos Aires: INTA.
- Organización Meteorológica Mundial. (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: Conceptos, progresos y desafíos futuros*. Ginebra: OMM. Recuperado de <http://www.wamis.org/agm/pubs/brochures/wmo1006es.pdf>
- Paredes, P. (2011). *Caracterización funcional de la Estepa Magallánica y su transición a Matorral de Mata Negra (Patagonia Austral) a partir de imágenes de resolución espacial intermedia* (Maestría, Universidad de Buenos Aires). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/144232977.pdf>
- Podestá, G., Skansi, M. de los M., Herrera, N., & Veiga, H. (2020). Descripción de índices para el monitoreo de sequía meteorológica implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. *OMM- Serie Reportes Técnicos, Reporte Técnico CRC-SAS-2015-001*, 26.
- Quiring, S. M. (2009). Developing Objective Operational Definitions for Monitoring Drought. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(6), 1217-1229. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2088.1>
- Rivera, J. (2014). *Aspectos climatológicos de las sequías meteorológicas en el sur de Sudamérica—Análisis regional y proyecciones futuras* (Doctoral, Universidad de Buenos Aires). Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. Recuperado de [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n5504\\_Rivera.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5504_Rivera.pdf)

- Rouse, W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation Systems in the great plains with ERTS. *Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A, 1: Technical Presentations*, 309. Washington, DC.: NASA.
- Sazib, N., Mladenova, I., & Bolten, J. (2018). Leveraging the Google Earth Engine for Drought Assessment Using Global Soil Moisture Data. *Remote Sensing*, 10(8), 1265. <https://doi.org/10.3390/rs10081265>
- 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(2), 301-315.
- Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). Recuperado 11 de marzo de 2022, 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., Arteaga-Ramirez, R., Vázquez Peña, M., & 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, 577-588. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i3.640>
- UNCCD. (1994). *Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, en particular en África*. United Nations Convention to Combat Desertification. Recuperado de [https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-08/UNCCD\\_Convention\\_text\\_SPA.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-08/UNCCD_Convention_text_SPA.pdf)
- Vaiman, N. (2018). *Comparación de índices climáticos y espectrales en la estimación de rendimiento de maíz y soja a nivel departamental en Entre Ríos* (Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales). Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Recuperado de [http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis\\_n6399\\_Vaiman](http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6399_Vaiman)
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wang, F., Yang, H., Wang, Z., Zhang, Z., & Li, Z. (2019). Drought Evaluation with CMORPH Satellite Precipitation Data in the Yellow River Basin by Using Gridded Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Remote Sensing*, 11, 485. <https://doi.org/10.3390/rs11050485>
- Wgnn, J., & Vmi, C. (2020). *Investigate The Sensitivity Of The Satellite-Based Agricultural Drought Indices To Monitor The Drought Condition Of Paddy And Introduction To Enhanced Multi-Temporal Drought Indices*. 11.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111-120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

- Wilks, D. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, Volume 100—3rd Edition* (3rd ed.). Academic Press. Recuperado de <https://www.elsevier.com/books/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences/wilks/978-0-12-385022-5>
- WMO. (2018). *Guide to climatological practices*. Geneva: World Meteorological Organization. Recuperado de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5541](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5541)
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Zhu, Q., Luo, Y., Zhou, D., Xu, Y.-P., Wang, G., & Gao, H. (2019). Drought Monitoring Utility using Satellite-Based Precipitation Products over the Xiang River Basin in China. *Remote Sensing*, 11(12), 1483. <https://doi.org/10.3390/rs11121483>