

VALORACIÓN DE LA MEGASEQUÍA EN LA PROVINCIA DE CACHAPOAL, CHILE, MEDIANTE PRODUCTOS MODIS

ASSESSING THE MEGADROUGHT IN PROVINCE OF CACHAPOAL, CHILE, USING MODIS PRODUCTS

Sr. Francisco Lobos¹, Sr. José Araos¹ y Sr. Marco A. Peña¹

RESUMEN

La megasequía que afecta a la provincia de Cachapoal, en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, fue valorada mediante el mapeo de la magnitud de cambio temporal de las variables NDVI (*normalized difference vegetation index*) y LST (*land surface temperature*), derivadas de productos compuestos MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)/Terra en quinquenios de los últimos 20 años. Para este propósito, los valores actuales (dentro de un período acotado a mediados del verano de 2021) de ambas variables fueron comparados en relación a sus equivalentes quinquenales entre 2001 y 2016 y normalizados en relación con su variabilidad temporal. Los resultados indican importantes descensos relativos de NDVI, así como importantes ascensos relativos de LST en gran parte del área de estudio durante el período de interés, comprometiendo no solo a los usos de suelo localizados en el valle sino también en montaña, los que podrían ser atribuibles a la escasez hídrica propugnada por la megasequía. Se espera que este estudio pueda orientar posteriores acciones de planificación y gestión ambiental de la escasez hídrica en la Provincia, con miras a ser replicable en otros rangos geográficos del territorio chileno.

Palabras claves: Megasequía, Bosque esclerófilo, Cachapoal, productos MODIS, teledetección

ABSTRACT

The mega-drought affecting the province of Cachapoal, in Libertador General Bernardo O'Higgins Region, Chile, was assessed by mapping the temporal change magnitude of NDVI (*normalized difference index*) and LST (*land surface temperature*) variables, retrieved from MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)/Terra composite products in quinquennia of the last 20 years. For this purpose, the current values (within a period bounded to mid-summer of 2021) of both variables were compared in accordance to their quinquennial equivalents between 2001 and 2016 and normalized regarding their temporal variability. Results indicate significant relative NDVI relative decreases, as well as significant LST relative increases, involving not only land uses located in the valley but in the mountain as well. These could be attributed to the water shortage advocated by the mega-drought. It is expected this study may orientate further planning and environmental managing actions regarding the mega-drought in the Province, in pursuit of replicate it in other geographical ranges of the Chilean territory.

Keywords: Mega-drought, Sclerophyllous forest, Cachapoal, MODIS products, remote sensing.

¹ Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado.

INTRODUCCIÓN

El territorio chileno históricamente se ha caracterizado por experimentar una alta variabilidad temporal en su mosaico climático, controlada en gran parte por la sucesión de eventos “El Niño” y “La Niña” (ENSO, *El Niño-Southern Oscillation*). No obstante, variaciones en la intensidad y extensión de estos han provocado comportamientos climáticos anómalos durante las últimas décadas, favoreciendo la ocurrencia y duración de periodos de sequía caracterizados por una escasa pluviosidad (Sarricolea y Mezeguer-Ruiz, 2016; Garreaud *et al.*, 2019).

Aldunce *et al.* (2017) señalan que la actual megasequía que afecta a la macrozona central de Chile (33°- 36° lat.), causada por un evento “La Niña” persistente, no posee precedentes, dado que no existe registro de un evento de esta naturaleza tan prolongado en esta zona en el último siglo, ni tampoco pareciera ser usual en el último milenio, situación que ha sido validada mediante reconstrucciones climáticas basadas en dendrocronología. Esto podría ser un indicador de la exacerbación del cambio climático en el territorio chileno producto del calentamiento global. De hecho, se estima que alrededor de un cuarto del déficit de precipitación durante la megasequía actual del país es atribuible al cambio climático de orden antropogénico (Marquet *et al.*, 2019).

Las sequías se han vuelto condiciones recurrentes en diversas regiones del planeta, afectando su seguridad alimentaria. La FAO (*Food and Agriculture Organization*, 2010) define una sequía como una deficiencia sostenida de precipitaciones, que tiene como consecuencia la insuficiencia de recursos hídricos para cubrir las demandas de un determinado territorio. El mismo organismo indica que las sequías pueden ser tipificadas en (1) meteorológicas; causadas por la falta de precipitaciones, (2) agrícolas; cuando no hay agua disponible en los suelos, e (3) hidrológicas; cuando hay una disminución en los caudales de los ríos.

Cuando anomalías climáticas se presentan prolongadamente sobre un territorio, generan impactos en distintos ámbitos que, por lo general, tienen consecuencias graves (Souvignet *et al.*, 2011; Vicuña *et al.*, 2011; Meza *et al.*, 2012). Tales impactos se pueden agrupar en económicos, sociales y ambientales, entre los cuales destacan la pérdida de producción agrícola, problemas de salud y aumento de morbilidad en sectores

vulnerables, así como daño a los ecosistemas (Ortega-Gaucín y Velasco, 2013).

Las sequías comprenden un riesgo considerable para los asentamientos humanos, puesto que el bienestar de sus habitantes depende en gran parte de la disponibilidad y accesibilidad del recurso agua (Herzer *et al.*, 2002). Además, no sólo la componente humana está expuesta al riesgo de sequía, sino también la flora y fauna de los territorios afectados, pudiendo experimentar una merma de biodiversidad y deterioro de sus hábitats, afectando así al ecosistema en su totalidad (Clark *et al.*, 2016).

Crocco (2021), señala que los déficits sostenidos de precipitaciones que presenta la zona central del país durante los últimos diez años han sido tan persistentes que en lugar de ser atribuibles a una megasequía podrían estar definiendo una nueva realidad. Además, el mismo autor plantea que las proyecciones climáticas para el año 2040 incluyen a Chile como uno de los 30 países que presentarán mayor estrés hídrico de mantenerse las actuales condiciones meteorológicas.

Debido a lo anterior, la evaluación y monitoreo de la megasequía y sus efectos en el medio físico adquiere suma importancia a nivel nacional, especialmente en la macrozona central del país, que al estar sujeta a un clima Mediterráneo, se encuentra más propensa a magnificar estos eventos, situación evidenciable en el avance del proceso de desertificación y degradación de sus suelos (Garreaud *et al.*, 2017).

Existen varios estudios que han analizado distintas aristas de los efectos de la variabilidad climática y la megasequía en la zona central del país, valiéndose de teledetección. Venegas-González *et al.* (2018) examinaron el efecto de la variabilidad climática sobre el desarrollo del roble blanco (*Quercus alba*) a través de índices espectrales de verdor vegetal. Orrego (2021) analizó las respuestas de distintas coberturas arbóreas a episodios de sequía entre 2000 y 2018, mediante el uso de índices espectrales de verdor y contenido de agua vegetal. Peña y Olmedo (2019) estimaron las variaciones espaciotemporales de albedo en los glaciares Olivares mediante imágenes satelitales ópticas. Peña y Martínez (2021) en tanto, modelaron la severidad de incendios forestales ocurridos durante la tormenta de fuego del verano de 2017, usando diferentes índices espectrales de estado vegetal.

En este contexto, es un aporte contar con estudios que, valiéndose de variables *proxies* de déficit hídrico derivadas de imágenes satelitales, aborden los efectos que ha producido a través del tiempo esta megasequía en el medio físico de la zona central del país. El presente estudio explora la magnitud de la megasequía que ha afectado en los últimos 20 años a la provincia de Cachapoal, cuyo territorio de eminente vocación silvoagropecuaria se encuentra proclive a los efectos de una escasez hídrica prolongada. Para esto, el estado de la vegetación nativa y la temperatura superficial de los suelos del área de estudio fueron cartografiados a partir de los productos NDVI (*normalized difference vegetation index*) y LST (*land surface temperature*), derivados del sensor óptico-térmico satelital MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite Terra.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la Provincia de Cachapoal, ubicada en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile (Figura 1). La provincia posee una superficie total de ~ 7.517 km², compuesta por 17 comunas, con una población aproximada de 650.000 habitantes y una economía centrada en actividades mineras, de servicios personales y silvoagropecuaria (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021a). Esta última resulta de interés para la presente investigación, dado que una parte importante de los suelos de la provincia poseen un uso rotativo-agrícola asociado a la cuenca hidrográfica del Río Cachapoal, y que, por lo tanto, puede verse preponderantemente afectado por la escasez hídrica.

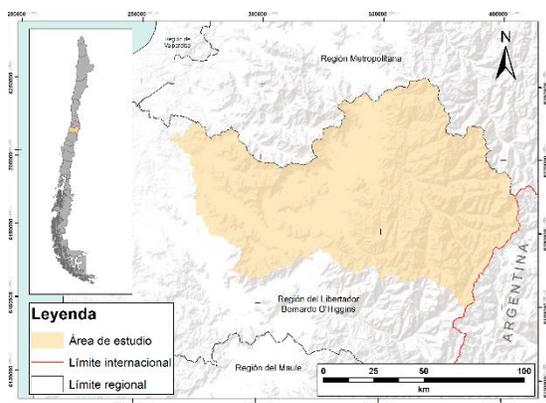


Figura 1. Localización del área de estudio: Provincia del Chachapoal, Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. Fuente: Elaboración propia.

El clima presente en la Provincia es de tipo templado mediterráneo, caracterizado por la presencia de cuatro estaciones marcadas: veranos cálidos y prolongados e inviernos fríos y secos (o lluviosos, dependiendo del factor ENSO), con estaciones intermedias de otoño y primavera que pueden ser variables tanto en temperaturas como en precipitaciones, estas últimas controladas fundamentalmente por el relieve (Novoa *et al.*, 2019). El relieve está dominado por el contraste entre fondos de valle y macizos montañosos y sus estribaciones pertenecientes a la cordillera de Los Andes y de la Costa, cuyas altitudes fluctúan entre 3.000 y 4.000 msnm, acercándose a los 5000 msnm en algunas cumbres andinas (e.g., Volcán Palomo, 4.860 msnm). En los valles, la vegetación nativa predominante es de tipo arbustiva, dominada por matorral esclerófilo, principalmente espino (*Acacia caven*), sin embargo, esta se encuentra altamente intervenida por suelos agrícolas de tipo frutícola, hortícola y vitivinícola. En las altitudes medias de la cordillera de Los Andes y sus estribaciones se presentan formaciones de bosque esclerófilo conformadas principalmente por las especies de litre (*Lithraea caustica*), maitén (*Maytenus boaria*), quillay (*Quillaja saponaria*), belloto del norte (*Beilschmiedia miersii*), peumo (*Cryptocarya alba*), molle (*Schinus latifolius*) y espino. Sobre los 1.400 msnm se pueden encontrar bosques de roble (*Nothofagus obliqua*) y ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*) (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021b).

MATERIALES Y MÉTODOS

DESCARGA DE IMÁGENES SATELITALES

Se utilizaron los productos MOD13Q1 de índices vegetales y MOD11A2 de temperatura y emisividad del suelo, derivados por el Equipo Científico MODIS de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) a partir del procesamiento de imágenes ópticas y térmicas adquiridas por el sensor MODIS, a bordo del satélite Terra, y disponibles para su descarga *online* desde el Sistema de Datos de Observación Terrestre de la NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search>).

El producto MOD13Q1 contiene el compuesto máximo de 16 días de NDVI con una resolución espacial de 250 m. Específicamente, se

emplearon cinco imágenes de NDVI de este producto: 2001, 2006, 2011, 2016 y 2021, aproximándolo al período central de la estación de verano, en este caso comprendido entre el 17 de enero y el 1 de febrero. El producto MOD11A2 en tanto, se conforma del compuesto promedio de 8 días de LST, con una resolución espacial de 1 km, empleándose los mismos años que el producto anterior, correspondientes en este caso al período comprendido entre el 17 y el 24 de enero.

PREPARACIÓN DE IMÁGENES Y CAPAS TEMÁTICAS

Previo a la fase de procesamiento de las imágenes, el formato original de los productos descargados (.hdf, *hierarchical data format*) fue transformado a .geotiff (*geodata tag image file format*) y proyectado al sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), elipsoide WGS84 (*World Geodetic System 1984*), mediante la extensión MODIS Toolkit disponible en el software ENVI® (*ENvironment for Visualizing Images*) v.5.3 (Exelis Visual Information Solutions, Inc., Boulder, EE.UU.). Adicionalmente, fueron descargados los límites vectoriales de la provincia de Cachapoal desde la plataforma *online* de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales).

Para propósitos de procesar e interpretar los productos MODIS referidos, también fueron descargados los usos de suelo vectoriales del área de estudio desde el portal *web* IDE (Infraestructura de Datos Espaciales) del Minagri (Ministerio de Agricultura) (<https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/22/pla-nificacion-catastral/>), así como sus unidades geomorfológicas, descargadas desde la Red CEDEUS (Centro de Desarrollo Urbano Sustentable), ([http://datos.cedeus.cl/layers/geonode:cl_unidades_s_geomorfológicas_geo](http://datos.cedeus.cl/layers/geonode:cl_unidades_geomorfológicas_geo)).

Mediante el empleo de estos datos fueron enmascaradas del área de estudio todos aquellos suelos de uso antrópico que pudieran introducir una distorsión en los análisis perseguidos, *i.e.*, suelos silvoagropecuarios y urbanizados. La información descargada se trabajó en *software* ArcMap® 10.5 (Esri Inc., West Redlands, EE.UU.), utilizando herramientas tanto ráster como vectoriales.

DETECCIÓN DE CAMBIO TEMPORAL DE NDVI Y LST

Los valores actuales de NDVI y LST actual (2021) fueron comparadas en relación con sus equivalentes quinquenales promediados dentro del período 2001-16, para lo cual fue aplicada la siguiente ecuación (Meroni *et al.*, 2019):

$$z_i = (x_i - x_{\bar{x}}) / x_{\sigma}$$

donde z_i corresponde a la magnitud de cambio estandarizada de un píxel de la imagen de NDVI o LST para el año 2021, x_i corresponde a un valor de píxel de la imagen de NDVI o LST de 2021, $x_{\bar{x}}$ es el promedio de ese píxel de NDVI o LST en el período de frecuencia quinquenal 2001-16, y x_{σ} es la desviación estándar de ese píxel de NDVI o LST para el mismo período. Las cartografías resultantes fueron discretizadas en rangos (clases) definidos a partir del cambio de un píxel dado de NDVI o LST en relación con su variabilidad en el período (Tabla 1).

Finamente, la clase más predominante o frecuente de ambas cartografías en cada uno de los usos de suelo del área de estudio, fue calculada aplicando un filtro de mayoría al interior de cada uno de estos.

Tabla 1. Rangos y magnitudes de cambios definidos para las variables NDVI y LST.

Rango	Magnitud de cambio	Descripción
$x > 1$	Incremento muy alto	El valor actual de la variable está por sobre su aumento promedio en el período de referencia
$0,5 < x \leq 1$	Incremento alto	El valor actual de la variable está muy de cerca de su aumento promedio en el período de referencia
$0 < x \leq 0,5$	Incremento moderado	El valor actual de la variable está cercano al promedio en el período de referencia
$0 \geq x > -0,5$	Decremento moderado	
$-0,5 \geq x > -1$	Decremento alto	El valor actual de la variable está muy de cerca de su descenso promedio en el período de referencia
$x \leq -1$	Decremento muy alto	El valor actual de la variable está por sobre su descenso

		promedio en el periodo de referencia
--	--	--------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LST Y NDVI

La Figura 2 presenta el promedio y la desviación estándar de LST a lo largo de los quinquenios de interés. En términos absolutos las diferencias de LST promedio entre años son menores, evidenciando una tendencia sostenida al alza dentro del período de interés, interrumpida por un ligero descenso excepcional en 2006.

Asimismo, la Figura 3 permite apreciar similares promedios de NDVI a lo largo de los quinquenios de interés, manifestando una tendencia al alza de sus valores, que sólo es interrumpida por un ligero aumento en 2016.

VALORACIÓN DE LA MAGNITUD DE CAMBIO TEMPORAL DE LST Y NDVI

La Figura 4 muestra la magnitud de cambio temporal de LST actual en el área de estudio. Se evidencia una predominancia de la clase de mayor aumento de LST 2021 en relación con su variabilidad promedio quinquenal 2001-16 (> 1), en gran parte de la cordillera andina, desde sus faldeos hasta sus dominios de retención crinival, sin atenderse a un patrón espacial asociado a una exposición o rango altitudinal determinado.

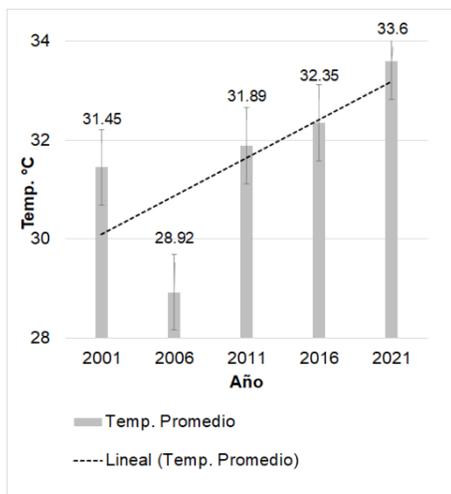


Figura 2. Promedio y desviación estándar quinquenal de LST entre 2001 y 2021. Fuente: Elaboración propia.

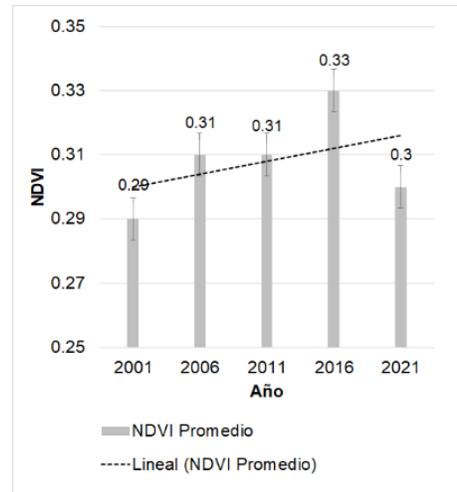


Figura 3. Promedio y desviación estándar quinquenal de NDVI entre 2001 y 2021. Fuente: Elaboración propia.

En el sector oeste en tanto, correspondiente a fondos de valle y algunas laderas de la cordillera de la Costa, se observa la predominancia de la clase de mayor descenso relativo de LST actual (≤ -1), distribuyéndose especialmente en torno a laderas. La Figura 5 muestra la magnitud de cambio de temporal de NDVI actual en el área de estudio.

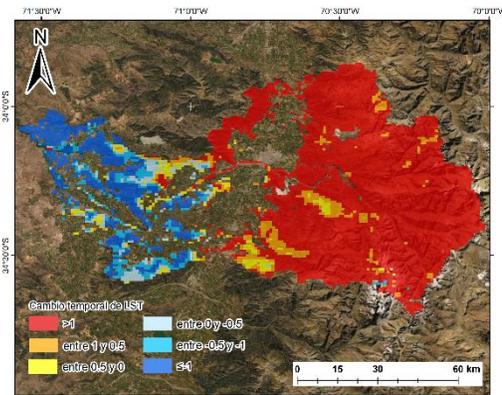


Figura 4. Cambio temporal actual (2021) de LST en relación con el periodo 2001-16. Fuente: Elaboración propia.

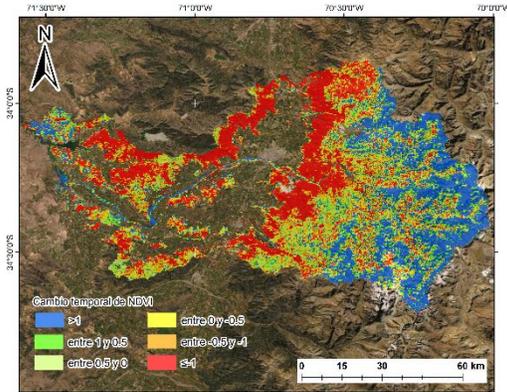


Figura 5. Cambio temporal actual (2021) de NDVI en relación con el periodo 2001-16. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, en los sectores más elevados de la cordillera andina predomina la clase de mayor aumento relativo de NDVI 2021 en relación con su variabilidad promedio quinquenal 2001-16 (> 1), distribuyéndose por lo general en usos de suelo correspondientes a nieve/hielo. En el valle por su parte, predomina la clase de mayor descenso relativo de NDVI actual, especialmente en laderas precordilleranas, donde se distribuye vegetación nativa.

PREDOMINANCIA ESPACIAL DE CAMBIOS TEMPORALES

La Tabla 2 permite observar que la clase de mayor aumento relativo de LST actual es la más predominante dentro del área de estudio (71,27 %).

Tabla 2. Superficie ocupada por los rangos de cambio temporal de LST.

Rango	Superficie	
	km ²	%
$x > 1$	3,905	71,27
$0,5 < x \leq 1$	330,13	6,02
$0 < x \leq 0,5$	169,54	3,09
$0 \geq x > -0,5$	181,37	3,31
$-0,5 \geq x > -1$	273,57	4,99
$x \leq -1$	619,79	11,31
Total	5.480	100

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3 en tanto, evidencia que las clases de mayor descenso y menor descenso relativo de NDVI actual son las más predominantes dentro del

área de estudio (29,03 y 26,18 %, respectivamente).

Tabla 3. Superficie ocupada por los rangos de cambio temporal de NDVI.

Rango	Superficie	
	km ²	%
$x > 1$	1.434,76	26,18
$0,5 < x \leq 1$	563,86	10,29
$0 < x \leq 0,5$	636,45	11,61
$0 \geq x > -0,5$	667,45	12,18
$-0,5 \geq x > -1$	586,48	10,70
$x \leq -1$	1.590,74	29,03
Total	5.480	100

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 finalmente, muestra los usos de suelo de la Provincia (A) y las clases de cambio temporal de NDVI (B) y LST (C) que más predominan en estos. En el primer caso, la clase de mayor aumento relativo de LST actual prevalece en todos los usos de suelo del área de estudio, excepto en cuerpos de agua (embalse Rapel). En el segundo caso, la clase de mayor descenso relativo de NDVI actual es dominante en todos los usos de suelo, excepto en cuerpos de agua y nieve/hielo.

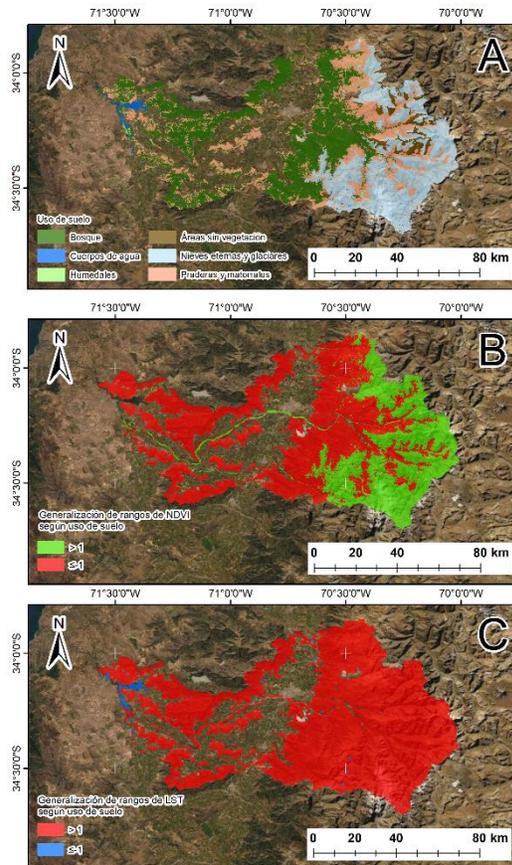


Figura 5. Generalización de rangos o clases de cambio temporal según usos de suelo (A) del área de estudio, para las variables NDVI (B) y LST (C). Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La aplicación de técnicas de detección de cambio temporal mediante el uso de sensores remotos puede verse facilitada por el uso de productos MODIS, debido a que las imágenes a partir de las cuales son derivados han sido sujetas previamente a equivalentes procedimientos de corrección atmosférica y obtención de reflectancias superficiales, validados por el equipo científico MODIS (Didan *et al.*, 2021). Lo anterior, minimiza posibles distorsiones espectrales en los datos de las variables calculadas, en especial si se pretende compararlas temporalmente (Jensen, 2015).

En este estudio, aplicamos LST y NDVI como *proxies* de déficit hídrico que permitieran dimensionar su magnitud de cambio temporal en el medio físico de la Provincia de Cachapoal, para lo cual se emplearon productos compuestos de aniversario de ambas variables. Esto contribuyó a

minimizar distorsiones espectrales ocasionadas por la variabilidad de temporal que pudiera afectar a los usos de suelo comprometidos (Jones y Vaughan, 2010).

Cabe tener en cuenta que la resolución espacial de los productos empleados, puede tornarse en una limitante para aplicaciones de gran escala cartográfica, toda vez que la variabilidad espacial de los patrones de LST y NDVI pueden diluirse dentro de la parcela definida por el píxel. No obstante, a escalas cartográficas como las de este de estudio, ambos productos son capaces de proveer suficiente detalle espacial como para caracterizar patrones espaciales dentro de las coberturas de suelo que componen a la Provincia.

El procedimiento de detección de cambio temporal empleado, cuenta con la ventaja de normalizar la diferencia obtenida de la sustracción de valores de una variable entre una imagen dada y una serie multitemporal de referencia, empleando para tal fin la desviación estándar de esta última. Esto facilita la interpretación y valoración de la magnitud de tal cambio, pues lo dimensiona con respecto a la variabilidad promedio de la variable en un periodo de interés (Meroni *et al.*, 2019).

Las variables LST y NDVI mostraron generalizados incrementos y decrementos temporales, respectivamente, indicativos de una alteración del estado de la vegetación y las propiedades térmicas del suelo dentro del período de interés, que podría ser atribuible a la escasez hídrica asociada a la megasequía. Garreaud (2017) afirma que las temperaturas en la zona central del país han aumentado paulatinamente durante las últimas décadas, destacando que en la cordillera de Los Andes estas muestran un aumento aún más significativo de casi 0,25° C por década. Asimismo, el autor consigna que las temperaturas oceánicas de la zona central han registrado una leve tendencia a la baja de 0,15° C, mientras que en el valle central han experimentado un ligero aumento a través de los años.

Tales aseveraciones podrían vincularse al aumento de LST evidenciado en este trabajo, en el entendido que una acentuación de las condiciones de aridez del área de estudio podría estar acarreado una mayor emisividad generalizada del suelo del área de estudio. Esto debido no sólo al aumento en la intensidad del flujo radiante descendente recibido como resultado de una disminución de la humedad atmosférica, sino

también a la alteración de las propiedades térmicas del suelo producto de su resequeidad (e.g., disminución de su inercia térmica y ascenso de su capacidad calórica) (Liang y Wang, 2012).

Consecuentemente, futuros estudios deberían encausar sus esfuerzos en precisar las posibles causas de este aumento de LST, valiéndose de mediciones de campo que permitan establecer correlaciones entre temperatura superficial emitida y atmosférica en los diferentes usos de suelo de interés, especialmente aquellos situados en la cordillera de Los Andes (Liang y Wang, 2012).

El fuerte aumento relativo de LST descrito anteriormente se condice con el fuerte descenso relativo de NDVI prevaleciente en el área de estudio, particularmente coincidente con el uso de suelo de bosque, el cual podría referir un deterioro en la cobertura de la vegetación nativa del área de estudio, que al igual que en el caso de LST podría vincularse a la megasequía (tal descenso se interrumpe en aquellos sectores desprovistos de vegetación a causa de la inhabilidad índice para responder a suelos desnudos). A este respecto, cabría otorgarle una dimensión biofísica a la magnitud de cambio temporal del NDVI aquí encontrada, para lo cual se tornaría necesario su modelado a partir de la colección de datos de campo referidos, por ejemplo, a productividad y evapotranspiración vegetal (Sánchez y Carvacho, 2006; Jones y Vaughan, 2010). Esto permitiría además, comprender el desfase temporal en la respuesta del NDVI respecto de cambios en el estado de la vegetación, contribuyendo a precisar la selección de fechas del producto.

Se espera que, debido a la relativamente simple implementación de la metodología aquí expuesta y a la necesidad por parte de los organismos competentes de contar con herramientas orientadas a planificar y gestionar ambientalmente la escasez hídrica de sus territorios, este trabajo sea un aporte al estado del arte de la valoración de la megasequía que afecta al medio físico de la provincia de Cachapoal, pudiendo ser replicable en otros rangos geográficos del país.

REFERENCIAS

ALDUNCE, P., ARAYA, D., SAPIAIN, R., RAMOS, I., LILLO, G., URQUIZA, A., GARREAUD, R. "Local perception of drought impacts in a changing climate: The mega-drought in central Chile. Sustainability". Vol 9, no 11, 2017, p. 2053.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. "Información territorial". *Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* [en línea] Año 2021. [fecha de consulta: 18 de junio de 2021]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region6/indica.htm>

BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE. "Clima y vegetación Región de O'Higgins". *Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* [en línea] Año 2021. [fecha de consulta: 18 de junio de 2021]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region6/clima.htm>

CLARK, J.S., IVERSON, L., WOODALL, C.W., ALLEN, C.D., BELL, D.M., BRAGG, D.C., D'AMATO, A.W., DAVIS, F.W., HERSH, M.H., IBAÑEZ, I., JACKSON, S.T., MATTHEWS, S., PEDERSON, N, PETER, M., SCHWARTZ, M.W., WARING, K.M., ZIMMERMANN, N.E. "The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States". *Global Change Biology*. Vol 22, no 7, 2016, p. 2329-2352.

CROCCO, J.J. "Megasequía: Diagnóstico, impactos y propuestas". *Punto de referencia*. Año 2021.

DIDAN, K. "MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061" [Data set]. *NASA EOSDIS Land Processes DAAC*. [en línea] Año 2021. [fecha de consulta: 18 de Junio de 2021 en: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION). "Gestión del riesgo de sequía y otros eventos climáticos extremos en Chile". *Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura, Santiago*. Año 2010.

GARREAUD, R.D., ALVAREZ-GARRETON, C., BARICHIVICH, J., BOISIER, J.P., CHRISTIE, D., GALLEGUILLOS, M., LEQUESNE, C., MCPHEE, J., ZAMBRANO-BIGIARINI, M. "The 2010 - 2015 Megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation". *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol 21, no 2, 2017, p. 6307-6327.

GARREAUD, R., BOISIER, J.P., RONDANELLI, R., MONTECINOS, A., SEPÚLVEDA, H.H., VELOSO-ÁGUILA, D. "The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics

perspective". *International Journal of Climatology*, Vol 40, no 1, 2019, p. 421-439.

HERZER, H., RODRÍGUEZ, C., CELIS, A., BARTOLOMÉ, M., CAPUTO, G. "Convivir con el riesgo o la gestión del riesgo". *Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Tercer Mundo*. Año 2002.

JENSEN, J.R. "Introductory digital image processing: a remote sensing perspective". *Pearson Series in Geographic Information Science*. Año 2015.

JONES, G., VAUGHAN, R. "Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications". *Oxford University Press*. Año 2010.

LIANG, S., WANG, J. "Advanced remote sensing: terrestrial information extraction and applications". *Academic press*. Año 2012.

MARQUET, P. ALTAMIRANO, A., ARROYO, M.T.K, FERNÁNDEZ, M., GELCICH, S., GÓRSKI, K., HABIT, E., LARA, A., MAASS, A., PAUCHARD, A., PLISCOFF, P., SAMANIEGO, H., SMITH-AMÍREZ, C. "Biodiversidad y cambio climático en Chile": Evidencia científica para la toma de decisiones. *Comité Científico de Cambio Climático COP25*. Año 2019.

MERONI, M., FASBENDER, D., REMBOLD, F., ATZBERGER, C., KLISCH, A. "Near real-time vegetation anomaly detection with MODIS NDVI: Timeliness vs. accuracy and effect of anomaly computation options". *Remote Sensing of Environment*. Vol 221, 2019, p. 508-521.

MEZA, F. J., WILKS, D. S., GUROVICH, L., BAMBACH, N. "Impacts of climate change on irrigated agriculture in the Maipo Basin, Chile: reliability of water rights and changes in the demand for irrigation". *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol 138, no 5, 2012, p. 421-430.

NOVOA, V., AHUMADA-RUDOLPH, R., ROJAS, O., MUNIZAGA, J., SÁEZ, K., ARUMI, J. L. "Sustainability assessment of the agricultural water footprint in the Cachapoal River basin, Chile". *Ecological indicators*. Vol 98, 2019, p. 19-28.

ORREGO, R. "Análisis de las respuestas de distintas coberturas arbóreas (nativas y forestales) a episodios de sequía en la zona centro-sur de
Revista Geográfica de Chile Terra Australis, Vol.57 (2021) 44-52 ISSN 0719-9562

Chile (34°S - 39°S) durante los años 2000 – 2018". *Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile*. Año 2021.

ORTEGA-GAUCÍN, D., VELASCO, I. "Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México". *Aqua-LAC*. Vol 5, no 2, 2013, p. 78-90.

PEÑA, M.A., MARTÍNEZ, G. "Mapeo del daño en bosques incendiados de Chile central, mediante el modelado de índices espectrales *ex-ante* y *ex-post*". *Bosque*. Vol 42, no 2, 2021, p. 205-215.

PEÑA, M., OLMEDO, F. "Estimación de las variaciones espacio temporales de albedo en los glaciares Olivares, Chile central". *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* Vol 55, 2019, p. 35-44.

SÁNCHEZ, M., CARVACHO, L. "Estimación de evapotranspiración potencial, ETP, a partir de imágenes NOAA-AVHRR en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins". *Revista de Geografía Norte Grande*. Vol 36, 2006, p. 49-60.

SARRICOLEA, P., MESEGUER-RUIZ, O. "Sequías en Chile central a partir de diferentes índices desde 1824. Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación del Territorio. Universidad de Alicante". *Instituto Interuniversitario de Geografía, Asociación Española de Climatología*. Año 2016.

SOUVIGNET, M., GAESE, H., RIBBE, L., KRETSCHMER, N., OYARZÚN, R. "Statistical downscaling of precipitation and temperature in north-central Chile: an assessment of possible climate change impacts in an arid Andean watershed". *Hydrological Sciences Journal- Journal des Sciences Hydrologiques*. Vol 55, no 1, 2010, p. 41-57.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A., JUÑENT, F.R., GUTIÉRREZ, A.G., PEÑA-ROJAS, K., FILHO, M.T. "Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central". *Bosque*. Vol 39, no 1, 2018, p. 81-93.

VICUÑA, S., GARREAUD, R. D., MCPHEE, J. "Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile". *Climatic Change*. Vol 105, no 3, 2011, p. 469-488.