

Carvacho Bart, L. y Sánchez Martínez, M. (2010): Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes MODIS en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile, en el período 2001-2005. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 728-737. ISBN 978-84-472-1294-1

COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN A PARTIR DE IMÁGENES MODIS EN LA REGIÓN DEL LIBERTADOR BERNARDO O´HIGGINS, CHILE, EN EL PERÍODO 2001-2005

Luis Carvacho Bart¹ y Marcela Sánchez Martínez²

(1) (2) Pontificia Universidad Católica de Chile, Instituto de Geografía, Avenida Vicuña Mackenna N°4860, Macul, Santiago, Chile
icarvach@uc.cl, mism@uc.cl. Proyecto Fondecyt 1085249.

RESUMEN

Se comparan cinco índices de vegetación, NDVI, SAVI, ARVI, GreenNDVI y EVI, calculados a partir de imágenes MODIS en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Se determina las características de sus comportamientos según cubiertas vegetales distintas, zonas agrícolas, praderas y forestal, y dos periodos contrastados a lo largo del año, verano e invierno de los años 2001, 2003 y 2005. Los resultados indican que si bien las tendencias generales de las mediciones de vigor vegetal que hacen estos índices son semejantes, existen diferencias localizadas que hacen evidente la necesidad de elegir correctamente el tipo de índice de acuerdo a las necesidades que cada investigación requiera. Se hace particular énfasis en la necesidad de contar con una mayor discriminación de cubiertas vegetales para hacer una evaluación más refinada de las semejanzas y diferencias entre los índices estudiados.

Palabras Clave: Índices de vegetación, MODIS, cubiertas vegetales, Chile

ABSTRACT

Five vegetation indices, NDVI, SAVI, ARVI, GreenNDVI and EVI, obtained from MODIS images in the Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, are compared. The characteristics of their behavior according different vegetation cover layers, agricultural, grasslands and forestal zones, in both dry and wet seasons, along the years in 2001, 2003 and 2005 are determined. Results shows that global tendencies in the behavior of this indices are similar, there are some localized differences that make evident the necessity of the correct election of the right index for each situation. The importance of a more detailed discrimination in land cover types in order to achieve a better assesstment of similarities and differences between the indices is emphasized.

Key Words: Vegetation indexes, MODIS, vegetation cover, Chile

INTRODUCCIÓN

En las últimas tres o cuatro décadas numerosos índices de vegetación (IV), calculados a partir de datos espectrales proporcionados por los sensores remotos satelitales, han sido desarrollados con la finalidad de obtener información sobre el estado de la vegetación y sus características. Estos índices aprovechan el particular comportamiento radiométrico de la vegetación sana en las diferentes bandas espectrales, especialmente, entre el

visible y el infrarrojo cercano. En efecto, mientras en el visible, en particular en la banda roja, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al infrarrojo cercano (Chuvieco, 2002). Estos contrastes son los que aprovechan los IV para establecer diferencias en la vegetación, sana y vigorosa, cuando los contrastes son mayores, y vegetación enferma o de baja densidad, cuando los contrastes son reducidos.

En 2008 Chengyuan et al contaban alrededor de cincuenta IV desarrollados por distintos grupos de investigación, entre los cuales, el NDVI (Rouse et al, 1974), es el que ha sido más ampliamente utilizado en estudios globales de seguimiento y evaluación de la dinámica vegetal, gracias a su facilidad de cálculo e interpretación (Chuvieco, 2002). En este sentido, un sensor de gran importancia ha sido el Advanced Very High Resolution Radiometer, embarcado en satélites de la serie NOAA, ya que, conforme a su alta resolución temporal y adecuada resolución espacial para estudios globales, proporciona imágenes a partir de las cuales se elaboran mosaicos mundiales y diarios de NDVI, ya desde 1981 (Glenn et al, 2008). También se consigue un producto similar con datos SPOT-Vegetation disponibles en tiempo casi real y presentado como compuestos de 10 días. Con la puesta en funcionamiento del sensor MODIS, MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, a bordo de los satélites Terra y Aqua de la National Aeronautics and Space Administration, NASA, se consiguen ventajas sobre otros sensores, si se comparan con imágenes de similar resolución espacial, y temporal, como los antes señalados, al tener una mayor resolución espectral, 36 canales en comparación a los cinco que aporta el sensor NOAA/AVHRR, por ejemplo. Numerosos estudios que antes se realizaban con AVHRR, de hecho, hoy se realizan con MODIS.

Aunque, como se ha dicho, el NDVI ha sido uno de los índices más utilizados, está bien documentado el efecto que produce en sus valores la sensibilidad del índice a las distintas proporciones entre vegetación y suelo presentes en el pixel, lo que ha generado un amplio interés en desarrollar otros índices que reduzcan este efecto (Schmidt y Karnieli, 2001; Chuvieco, 2002). Así, Huete (1988) introdujo el Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI, el cual incluye una constante (L) ajustada al suelo, lo que minimiza el efecto de la reflexión provocada por el suelo. Otro factor que modifica el valor del NDVI es el efecto de absorción atmosférica, por lo cual se ha propuesto el índice Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI (Kaufman y Tanré, 1992) el que ajusta el valor del NDVI a las condiciones atmosféricas, teniendo en cuenta la diferente dispersión de las bandas azul y roja (Chuvieco, 2002). El índice GreenNDVI (Gitelson et al, 1996), por su parte, es resistente también a los efectos atmosféricos, ya que tiene un mayor rango dinámico que el NDVI y es cinco veces más sensible a la concentración de clorofila-a; este IV evita el problema de saturación del NDVI a concentraciones de clorofila relativamente bajas (se satura, dependiendo de la especie, con cantidades tan bajas como 2 $\mu\text{g}/\text{cm}$ de clorofila-a (Vogelman et al, 1993). Por su parte, el Enhanced Vegetation Index, EVI, agrega a las bandas infrarroja cercana y del rojo, la banda azul, junto con coeficientes de corrección atmosférica y del efecto de suelo desnudo. Este índice es un buen complemento al NDVI, puesto que si este último es esencialmente sensible a las variaciones de la banda roja, el EVI es más sensible a la banda infrarroja cercana, lo que lo hace diferenciar de mejor forma las variaciones estructurales del dosel vegetal (Gao et al, 2003).

Aunque las aplicaciones de los IV, como los indicados, en el estudio de la vegetación, de sus características y de su estado son ampliamente conocidas, tal como señalan Wardlow y Egbert (2010) no existen tantos estudios o publicaciones dedicados a la determinación y evaluación de los resultados que entregan los diferentes índices. Las investigaciones de este tipo realizan comparaciones entre dos o más IV obtenidos desde imágenes proporcionadas por un mismo sensor y también por sensores diferentes; toman distintas áreas de estudio y comparan el comportamiento de los IV entre diversas cubiertas. Conforme con esto, el trabajo que se presenta pretende introducir esta área de investigación al comparar los cinco IV expuestos (NDVI, SAVI, ARVI, GreenNDVI y EVI) calculados a partir de imágenes MODIS en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. Se espera determinar las características de sus comportamientos según cubiertas vegetales distintas y época del año. Se consideran zonas agrícolas, praderas y forestal, y dos periodos contrastados a lo largo del año, verano e invierno de los años 2001, 2003 y 2005. Interesa, en todo caso, conocer el grado de diferencia y de similitud entre los valores de vigor vegetal que entregan los distintos índices.

ÁREA DE ESTUDIO

La Región del Libertador General Bernardo O'Higgins se localiza en Chile, directamente al sur de la Región Metropolitana de Santiago y de la Región de Valparaíso, y al norte de la Región del Maule. Se extiende, aproximadamente, entre los 33° 50' y los 34° 45' de latitud sur, y desde la cordillera de los Andes en su límite con Argentina, por el este, hasta el océano Pacífico, por el oeste. Tiene una superficie de 16.387 km² y una población de 780.627 habitantes, según el último censo de población (2002), con una densidad de 47,63 habitantes por kilómetro cuadrado. Se presentan en ella las cuatro grandes unidades morfológicas que caracterizan el territorio

nacional sudamericano: de este a oeste la cordillera de los Andes, la depresión intermedia, la cordillera de la Costa y las planicies litorales, estas últimas de gran desarrollo en la Región. Ambas cordilleras se presentan enérgicamente, acercándose en algunos sectores para dar lugar a la denominada Cuenca de Rancagua, emplazada dentro de la depresión intermedia regional. Esta disposición del relieve y su situación con respecto al océano generan contrastes espaciales en los elementos naturales del paisaje, entre ellos, el clima, las características del suelo y la distribución de la vegetación. Dentro del clima templado general, el dominante en la Región es del tipo mediterráneo con lluvias durante la estación fría y un periodo seco en la estación cálida; esta última, conforme el Atlas Agroclimático de Chile (INIA, 1989), alcanza entre cuatro y seis meses, según la estación meteorológica considerada. En la alta cordillera es posible identificar un clima frío provocado, fundamentalmente, por la altura. La diferenciación clara de cuatro estaciones al año influye fuertemente en la producción agrícola, una de las actividades las destacadas de la región, junto a la industria, la minería y el turismo. En la región se localizan numerosas empresas transnacionales de productos hortofrutícolas que poseen plantas de empaque para la exportación.

METODOLOGÍA

La metodología empleada se divide en cuatro grandes partes: procesamiento de las imágenes, cálculo de los índices, obtención de verdad terreno y comparación de los mismos. Estas etapas se detallan a continuación.

Procesamiento de las imágenes

Las imágenes se descargaron desde el sitio LAADS de NASA en su formato original HDF-EOS. Estas imágenes fueron luego procesadas por medio del software HEG, provisto también por NASA, obteniéndose imágenes en formato TIF, cada una acompañada de su respectivo archivo de metadatos MET. Se desarrollaron soluciones propias para automatizar este proceso, lo que permitió realizar todas las conversiones en cosa de horas. Luego estas imágenes fueron convertidas a formato ESRI Grid para poder ser procesadas por el software ArcGis. Se obtuvieron así imágenes en resolución espacial de 250 (productos Q), 500 (Productos H) y 1.000 metros (productos 1KM) de acuerdo a los campos de bandas presentes en la imagen MODIS.

Tabla 1. Campos de bandas espectrales y resolución espacial respectiva presentes en una imagen MODIS 1KM

Resolución	Campo	Bandas campo	Identificador correlativo de banda
250 m	EV_250_RefSB	1 y 2	1 y 2
500 m	EV_500_RefSB	1 a 5	3 a 7
1 km	EV_1KM_RefSB	1 a 15	8 a 19
	EV_1KM_Emissive	1 a 16	20 a 36 (excepto la 26)
	EV_Band26	1	26

Fuente: elaboración propia sobre la base de información de NASA

Cálculo de índices

Los índices se calcularon utilizando las bandas roja y NIR con resolución espacial de 250 m, y azul y verde, cuando se requiere, con resolución espacial de 500 m. Los valores de reflectividad se escalaron de acuerdo a los valores presentes en los metadatos de cada imagen en el objeto ADDITIONALATTRIBUTESCONTAINER, sub objeto PARAMETERVALUES, clave VALUES. Con los valores escalados de reflectividades, se programó un modelo en la herramienta *Model Builder* de ArcGis que permitió calcular los cinco índices simultáneamente para cada imagen. En el mismo modelo, se filtraron los valores anómalos presentes en los índices asignando -1 a todos aquellos que aparecieran bajo este umbral y 1 a todos aquellos mayores a este último. La cantidad de valores anómalos no resultó significativa. Este modelo se programó en *batch* para que se realizara automáticamente sobre cada imagen y fecha de estudio. Con las imágenes de índices calculados para los meses de interés, se realizó un compuesto de máximo valor mensual para cada índice para los meses de enero y agosto de los años 2001, 2003 y 2005.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los índices NDVI, SAVI, ARVI, GreenNDVI y EVI son las siguientes:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

donde: NDVI: Normalized Difference Vegetation Index; NIR reflectividad en la banda del infrarrojo cercano; R: reflectividad en la banda del rojo.

$$SAVI = \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \times (1 + L)$$

donde: SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index; NIR reflectividad en la banda del infrarrojo cercano; R: reflectividad en la banda del rojo; L: constante para ajustar la línea vegetación-suelo al origen, 0,5.

$$ARVI = \frac{NIR - (R - 1 \times (R - B))}{NIR + (R - 1 \times (R - B))}$$

donde: ARVI: Atmospherically Resistant Vegetation Index; NIR reflectividad en la banda del infrarrojo cercano; R: reflectividad en la banda del rojo; B: reflectividad en la banda del azul.

$$GreenNDVI = \frac{NIR - G}{NIR + R}$$

donde: GreenNDVI: NIR reflectividad en la banda del infrarrojo cercano; G: reflectividad en la banda del verde R: reflectividad en la banda del rojo.

$$EVI = 2,5 \times \frac{(NIR - R)}{(NIR + C1 \times R - C2 \times B + L)}$$

donde: EVI: Enhanced Vegetation Index; NIR reflectividad en la banda del infrarrojo cercano; R: reflectividad en la banda del rojo; B: reflectividad en la banda del azul; los coeficientes adoptados en el algoritmo son: L=1, C1 = 6, C2 = 7,5.

Obtención de verdad terreno

Para tener la caracterización de las cubiertas que reflejan los índices de vegetación se utilizó una imagen Landsat TM del año 2003 clasificada mediante algoritmo de máxima probabilidad. La fiabilidad de la clasificación resultó superior al 87% según el índice kappa. Dada la baja dinámica de cambio de suelo de la Región, y al grado de generalización de las cubiertas elegidas como indicadoras, se asumió que las cubiertas definidas en esta imagen se utilizarían también para las comparaciones de los años 2001 y 2005. La figura 1 muestra la cobertura del suelo en el área de estudio, presentándose en amarillo y en tonos de verde las tres cubiertas vegetales, áreas agrícolas, de praderas y forestales, elegidas para compara y evaluar los índices.

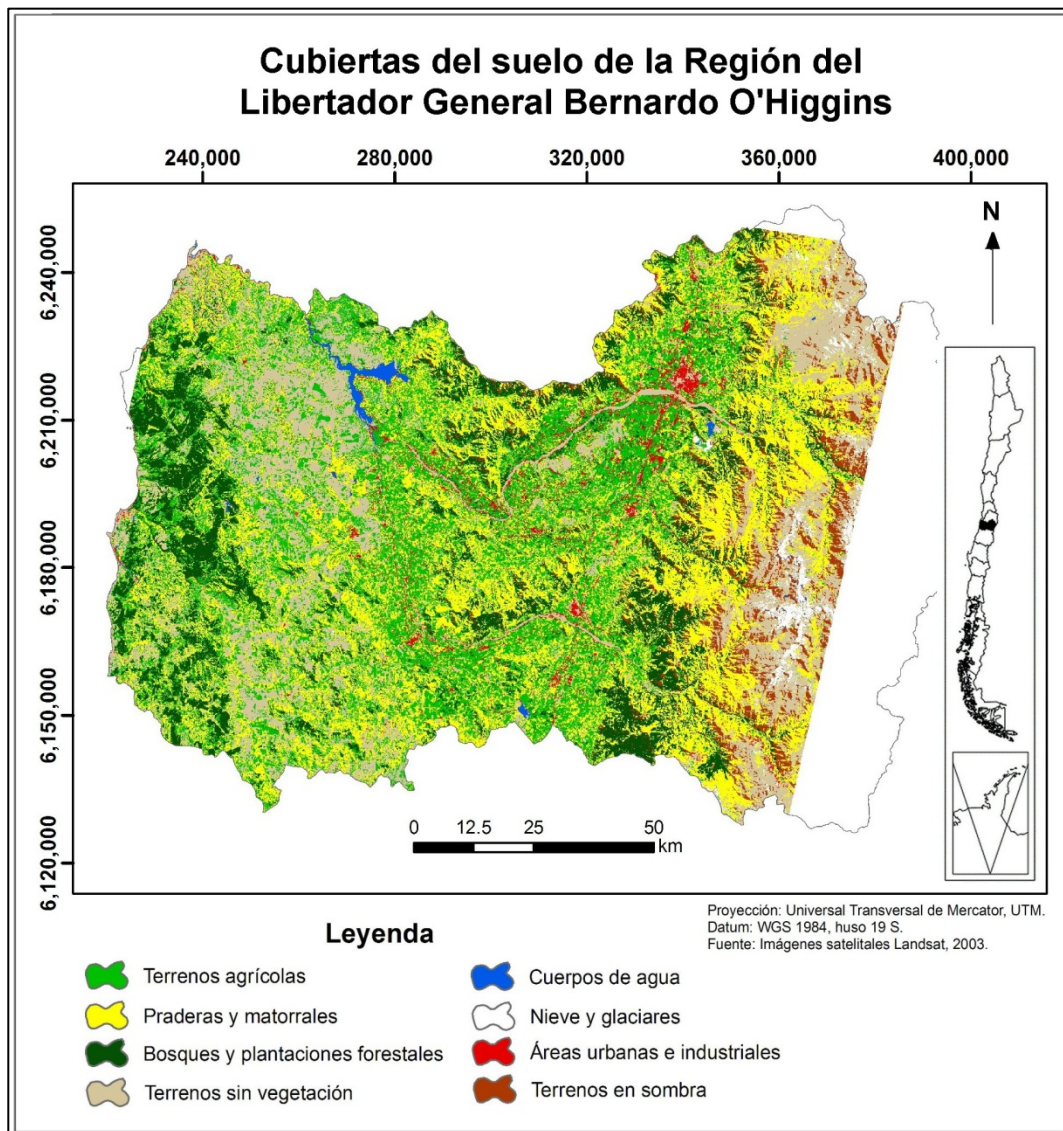


Figura 1. Cubiertas del suelo de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins

Comparación de índices

La comparación de la semejanza o diferencia de los índices de vegetación se realizó mediante análisis de correlación de los valores medidos de vigor vegetal de cada índice en los distintos tipos de cobertura elegidos y para cada mes y año estudiado. Los valores digitales de los IV sobre estas cubiertas fueron convertidos a formato ASCII e importados en el software estadístico SPSS donde se calcularon las matrices de correlación respectivas, derivando los coeficientes de determinación para cada matriz.

RESULTADOS

Se obtuvo un promedio de 300 imágenes para cada uno de los tres años, 2001, 2003 y 2005, y para cada índice, con lo cual se tiene un total de 1.500 imágenes relativas a índices vegetacionales diarios para cada año. Después de generar composiciones mensuales de máximo valor para cada índice se obtuvo un total de 180 imágenes compuestas. Cabe señalar que este estudio es parte de uno mayor que abarca el periodo comprendido entre los años 2001 y 2006, presentándose aquí solo tres de ellos.

Para mostrar los resultados generales, correspondientes a los cinco IV calculados para toda la región, se toman como composiciones mensuales representativas aquellas correspondientes a los meses de enero y agosto, ya que, por una parte, enero representa un mes netamente seco y agosto uno húmedo, con ello, es posible observar diferencias importantes en los valores que reflejan estos índices. En la figura 2 se presentan los resultados obtenidos para enero y agosto del año 2003 para cada índice. En ella se aprecian las distintas respuestas a las estaciones seca y húmeda en todos los IV, aunque algunos de ellos presentan mayores discriminaciones que otros en las respectivas estaciones. En particular, puede mencionarse al ARVI que diferencia muy bien la vertiente oriental de la cordillera de la Costa, claramente distinguible debido a los bajos valores en este IV, los cuales no son percibidos en la estación húmeda por los otros índices. En la estación húmeda se aprecia que existe una mayor homogeneidad en la respuesta de los índices que en la estación seca con la excepción del ARVI, como ya se dijo. Los mayores valores de los IV son entregados por las respuestas del ARVI y del GreenNDVI en la estación húmeda como es de esperar. El ARVI también presenta los mayores valores de IV en la estación seca, junto con el SAVI, particularmente en la vertiente de influencia pacífica de la cordillera de la Costa. Por su parte, el EVI presenta los mayores valores del índice en la depresión intermedia, correspondiendo a las principales zonas agrícolas de riego de la región.

Tal como se ha indicado, es de interés para este estudio comparar el comportamiento espacial y temporal de los diferentes índices empleados, en función de distintas cubiertas del suelo y épocas del año. Se extrajeron de las imágenes compuestas de cada IV los valores correspondientes a las zonas de cada cubierta y se correlacionaron entre sí los valores de los cinco índices. Las matrices de correlación obtenidas permiten obtener una visión del comportamiento de los índices de vegetación sobre las distintas cubiertas y estaciones en estudio. Se generaron 18 matrices de correlación correspondientes a tres cubiertas para mes seco y mes húmedo y para los tres años seleccionados. En estas correlaciones se pudo observar una semejanza global en el comportamiento de los índices en los años estudiados, por lo que acá se presentarán los resultados para el año 2003 que es el que coincide cronológicamente con la imagen utilizada para la extracción de las cubiertas de suelo.

Tabla 2. Matriz de correlación entre los índices NDVI, SAVI, ARVI, GreenNDVI y EVI en las cubiertas forestal, pradera y agrícola, año 2003

Forestal enero 2003					
	NDVI	SAVI	ARVI	GNDVI	EVI
NDVI	1,000	0,831	0,911	0,749	0,566
SAVI	0,831	1,000	0,660	0,738	0,766
ARVI	0,911	0,660	1,000	0,434	0,615
G_NDVI	0,749	0,738	0,434	1,000	0,215
EVI	0,566	0,766	0,615	0,215	1,000

Forestal agosto 2003					
	NDVI	SAVI	ARVI	GNDVI	EVI
NDVI	1,000	0,960	0,843	0,913	0,927
SAVI	0,960	1,000	0,707	0,913	0,983
ARVI	0,843	0,707	1,000	0,613	0,714
G_NDVI	0,913	0,913	0,613	1,000	0,841
EVI	0,927	0,983	0,714	0,841	1,000

Pradera enero 2003					
	NDVI	SAVI	ARVI	GNDVI	EVI
NDVI	1,000	0,798	0,799	0,508	0,538
SAVI	0,798	1,000	0,495	0,498	0,777
ARVI	0,799	0,495	1,000	0,141	0,575
G_NDVI	0,508	0,498	0,141	1,000	0,144
EVI	0,538	0,777	0,575	0,144	1,000

Pradera agosto 2003					
	NDVI	SAVI	ARVI	GNDVI	EVI
NDVI	1,000	0,929	0,314	0,933	0,894
SAVI	0,929	1,000	0,054	0,899	0,984
ARVI	0,314	0,054	1,000	0,087	0,102
G_NDVI	0,933	0,899	0,087	1,000	0,831
EVI	0,894	0,984	0,102	0,831	1,000

Agrícola enero 2003					
	NDVI	SAVI	ARVI	GNDVI	EVI
NDVI	1,000	0,899	0,910	0,637	0,744
SAVI	0,899	1,000	0,750	0,645	0,862
ARVI	0,910	0,750	1,000	0,357	0,770
G_NDVI	0,637	0,645	0,357	1,000	0,320
EVI	0,744	0,862	0,770	0,320	1,000

Agrícola agosto 2003					
	NDVI	SAVI	ARVI	GNDVI	EVI
NDVI	1,000	0,953	0,795	0,935	0,954
SAVI	0,953	1,000	0,607	0,948	0,996
ARVI	0,795	0,607	1,000	0,579	0,641
G_NDVI	0,935	0,948	0,579	1,000	0,928
EVI	0,954	0,996	0,641	0,928	1,000

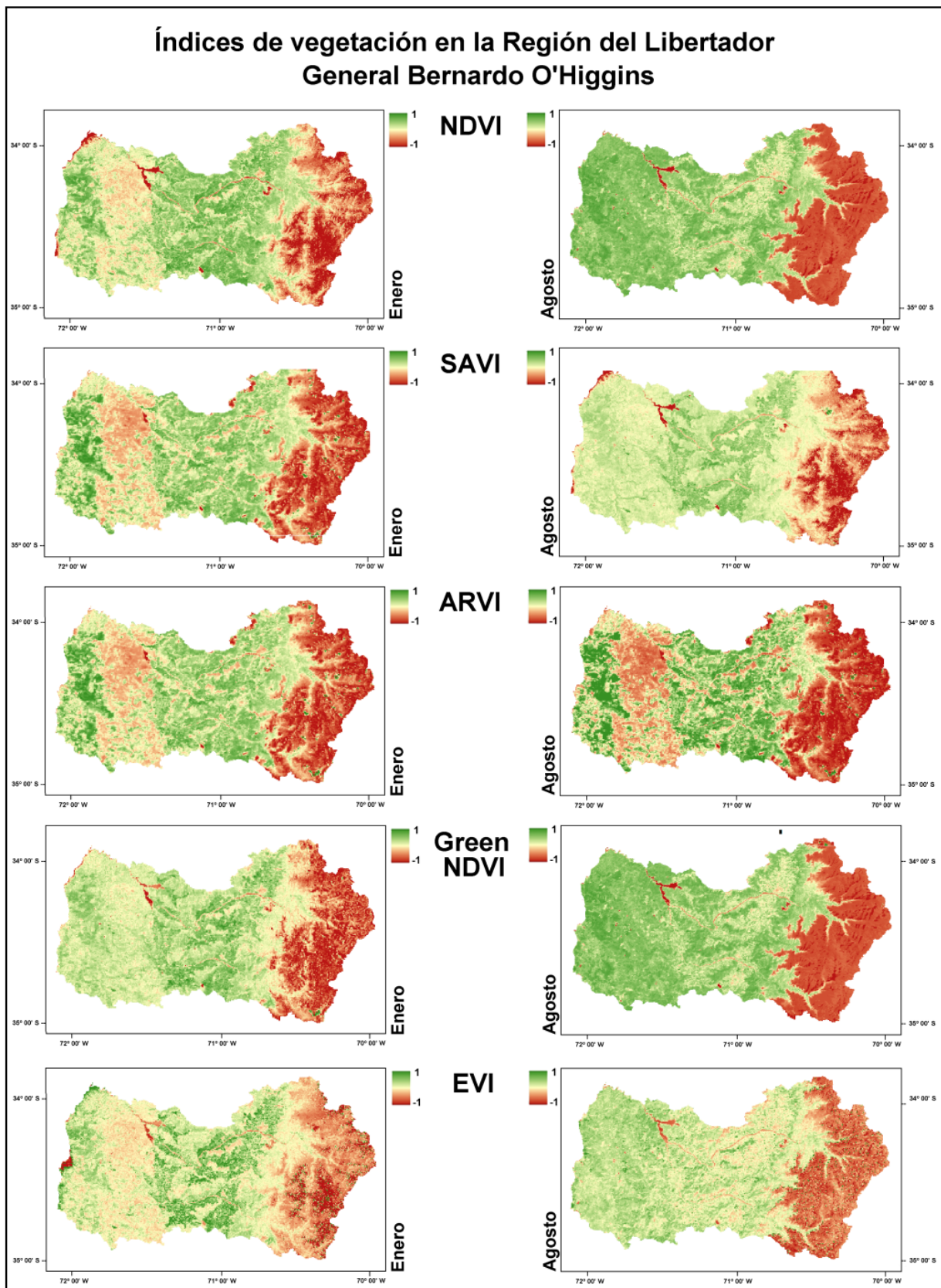


Figura 2. Índices de vegetación obtenidos para el año 2003. Composiciones de máximo valor para los meses de enero (seco) y agosto (húmedo)

Respecto al comportamiento de los índices, se puede concluir a partir de las matrices de correlación, que éstos tienen una mayor semejanza entre sí en los meses de invierno que en verano, lo que refleja claramente la mayor heterogeneidad en el vigor vegetal de algunas cubiertas en los meses secos. Si se hace la distinción por cubiertas, la menor similitud entre los IV se produce en la cubierta de praderas para la estación seca así como en la estación húmeda. Esta situación debería revertirse haciendo una clasificación más exhaustiva de la cubierta pradera, ya que ésta involucra una variedad de especies muy diversas y de aparición en distintos tipo de condiciones locales. En el aspecto interanual, las tendencias generales se mantienen para todos los índices estudiados.

El NDVI es el índice que demuestra un comportamiento más homogéneo con respecto a los demás, puesto que en el conjunto de cubiertas, épocas y años sus valores de correlación son los más elevados respecto a los demás. Esto es esperable, puesto que todos los índices incorporan las bandas con que se construye el NDVI y sobre las cuales se agregan otras bandas o parámetros de calibración específicos para ellos. El índice SAVI también tiene un comportamiento similar al NDVI respecto a los demás índices (ARVI, GreenNDVI y EVI) lo que es consistente con los motivos expuestos para el NDVI dada su construcción basada en las bandas roja y NIR. El ARVI, índice que corrige la interferencia atmosférica, tiene un comportamiento distinto en los meses secos y húmedos, pues su semejanza con los comportamientos de los demás índices es mayor en enero que en agosto, lo que es consistente con la transparencia atmosférica de los meses estivales en esta región. Con respecto a los índices EVI y GreenNDVI, éstos presentan la mayor diferencia de comportamiento respecto a los demás índices en todos los casos. Esto puede deberse a que las constantes de ajuste y ganancia que se utilizan en la construcción de estos índices no se ajustan adecuadamente a las condiciones locales del área de estudio, cuestión que deberá enfocarse con más detalle en próximos trabajos.

La figura 3 muestra un ejemplo de las tendencias de comportamiento de los índices sobre una de las cubiertas estudiadas. Las tendencias de dichos gráficos son consistentes con los valores de correlación mostrados en las tablas.

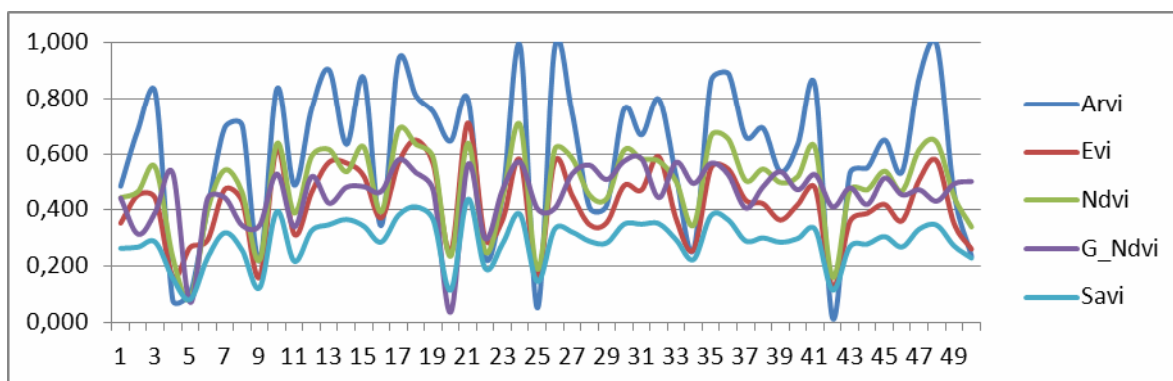


Figura 3. Ejemplo del comportamiento de los cinco índices para la cubierta Forestal para enero del año 2003, sobre una muestra de 50 píxeles escogidos al azar.

CONCLUSIONES

Los índices han mostrado su diferente reacción a las cubiertas vegetales que midieron, aunque una mejor comparación de respuestas debe realizarse sobre una referencia de verdad terreno con una mayor resolución de categorías, en particular, en la categoría de praderas, y con una segmentación mayor en áreas de riego y seco y en sectores de distinta exposición solar. Este trabajo pretende ser una base de comparación para, posteriormente, al refinar las condiciones de identificación de cubiertas vegetales, obtener una discriminación más precisa de las capacidades de cada índice, no sólo del tipo de respuesta de las especies según la época del año, sino también del grado de generalización en la identificación de ellas que haga notoria la necesidad de utilizar un índice u otro.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio es parte de un proyecto mayor, FONDECYT 1085249, financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, dependiente de CONICYT, Chile.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chengyuan, H; Shaohong, W. y Chaunyang, X. (2008): Comparison of some vegetation indices in seasonal information. *Chinese Geographical Science*, 18 (3): 242-248.
- Chuvienco, E. (2002): *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel, Madrid, 592 pp.
- Gao, X.; Huete, A.R. y Didan, K. (2003): Multisensor comparisons and validation of MODIS vegetation indices at the semiarid Jornada Experimental Range. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 41 (10): 2368-2381.
- Gitelson, A.; Kaufman, Y. y Merzlyak, M. (1996): Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58 (3): 289-298.
- Glenn, E.P.; Huete, A.R.; Nagler, P.L. y Nelson, S.G. (2008): Relationship between remotely-sensing vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, (8): 2136-2160.
- Huete, A.R. (1988): A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K. y van Leeuwen, W. (1997): A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59 (3): 440-451.
- Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodríguez, E.; Gao, X. y Ferreira, L. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performances of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83: 195-213.
- INIA (1989): *Mapa Agroclimático de Chile*. Editores: Novoa, R. y Villaseca, S. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, 221 pp.
- Kaufman, Y. y Tanré, D. (1992): Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 30: 261-270.
- Schmidt, H. y Karnieli, A. (2001): Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid environment: the Makhtesh Ramon Crater (Israel) case study. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (17): 3503-3520.
- Vogelman, T.C.; Rock, B.N. y Moss, D.M. (1993): Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1563-1575. Citado por Gitelson et al, 1996.
- Wardlow, B.D. y Egbert, S. (2010): A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (3): 805-830.