

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**USO DE TELEDETECCIÓN SATELITAL PARA LA EVALUACIÓN Y MONITOREO
DE SEQUÍAS. APLICACIÓN EN LA REGIÓN DE COQUIMBO**

**JUAN CRISTÓBAL DÍAZ¹
XIMENA VARGAS M.²**

RESUMEN

En este artículo se aborda la utilización de indicadores de sequías basados en registros de teledetección, con la intención de analizar en forma efectiva y consistente la ocurrencia de este fenómeno en la IV Región del país. Las variables que se consideran en este estudio son la cobertura nival y condiciones de la vegetación por lo que para el análisis se usan los indicadores NDSI y NDVI, respectivamente, definidos a base de imágenes captadas por los sensores NOAA (proporcionadas por el Centro de Estudios Espaciales de la Universidad de Chile) y MODIS (obtenidas gratuitamente de la página <http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Dado que el registro de imágenes fue escaso y discontinuo, sólo fue posible interpretar a través de los indicadores, la sequía acontecida entre 1998 y 1999, comprobando solamente la validez de la cobertura nival como indicador. Con respecto a la calidad de la información satelital en general, se concluye que las imágenes MODIS de 500 m de resolución espacial, se adaptan bien al análisis de sequías ya que permiten visualizar en forma global la IV Región y además poseen una alta resolución temporal.

¹ Ingeniero Civil, Ayudante de investigación, Depto. de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: judiaz@ing.uchile.cl

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: xvargas@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN

Según el National Weather Service de Estados Unidos, la sequía “es una situación climatológica anormal que se da por la falta de precipitación en una zona, durante un período de tiempo prolongado”. Por su parte, La Organización de las Naciones Unidas (ONU, 1994) define la sequía como: “fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recurso de la tierra”

Existe una diversa gama de acepciones diferentes de sequías ya que resulta difícil englobar el concepto que ésta involucra en una definición única. Esto se debe a que las sequías presentan características variables según el lugar donde se produzcan; así, sequías consideradas de gravedad similar pueden tener impactos sorprendentemente diferentes como resultado de diferencias ecológicas, socioeconómicas y culturales. Esta diferencia de impactos repercute en la percepción del evento lo que dificulta la utilización del término. Debido a esto, resulta complicado definir la sequía considerando solamente la disminución de la disponibilidad de agua. Por ende, debe tomarse en cuenta que el concepto de sequía involucra además un impacto negativo sobre alguna actividad económica, situación social o ecosistema natural.

Sin embargo, su origen está asociado básicamente a la variabilidad del clima o a condiciones meteorológicas que se traducen en un déficit marcado de precipitaciones en una región en relación a una situación normal, entendiéndose como situación normal a los valores promedio de un registro histórico de precipitaciones. En base a lo anterior, una definición aceptable de sequía puede ser una reducción temporal notable del agua y la humedad disponibles, por debajo de la cantidad normal o esperada para un período dado.

A diferencia de otros desastres naturales como las inundaciones o los terremotos, la sequía se caracteriza por tener un desarrollo lento y prolongado en el tiempo (meses a años), lo que origina desbalances importantes en el ciclo hidrológico, afectando la disponibilidad de agua en sus diversas fuentes. En consecuencia, con el objetivo de lograr un desarrollo adecuado de los sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos y de idear planes de evaluación, monitoreo y manejo del fenómeno, se hace necesario conocer y cuantificar las propiedades básicas de las sequías.

El uso de indicadores hidrometeorológicos de sequías ha sido utilizado en varios países para elaborar análisis de sequías orientados a cuantificar las características principales de estas. Países como EEUU, México y España, entre otros, han adoptado métodos basados en registros de variables hidrometeorológicas, con la intención de determinar propiedades tales como intensidad, severidad, duración y extensión espacial de las sequías.

Como un método alternativo y complementario al análisis tradicional de sequías se ha desarrollado el uso de técnicas espaciales centrado esencialmente en la teledetección satelital o percepción remota. La teledetección satelital, que consiste básicamente en la captación de imágenes satelitales desde sensores instalados en la atmósfera, se ha desarrollado bastante las últimas décadas presentando importantes aplicaciones en el ámbito de los recursos naturales.

En Chile la sequía es un fenómeno recurrente que se extiende principalmente sobre la zona central del país. Su origen puede ser asociado en gran medida a la presencia del fenómeno de la Niña y del anticiclón del Pacífico y el mayor impacto lo reciben aquellas regiones cuyas cuencas disponen de una menor infraestructura de regulación hidrológica. En particular, la IV región de Coquimbo ha sido continuamente afectada por sequías que originaron pérdidas considerables en la actividad agrícola de secano y principalmente en la actividad ganadera. Si bien la región cuenta con una infraestructura de regulación importante, la agricultura de riego no está exenta de los impactos generados por las sequías por lo que un déficit prolongado de precipitaciones puede originar un descenso notorio en los caudales superficiales de ríos y, por consiguiente, una disminución en el nivel de los embalses destinados a la producción agrícola de riego.

En este artículo, en el marco del proyecto CYTED “Uso de tecnologías espaciales para la evaluación, monitoreo y manejo de desastres naturales en la agricultura”, se aborda la utilización de indicadores de sequías basados en registros de teledetección, con la intención de analizar en forma efectiva y consistente la ocurrencia de este fenómeno en la IV Región del país.

2. ANTECEDENTES SOBRE LA TELEDETECCIÓN SATELITAL

La teledetección o percepción remota es la ciencia de obtener e interpretar información desde la distancia, usando sensores que no tienen contacto con el objeto físico que está siendo observado (Smith, 2001). El término se restringe a los métodos que detectan y miden la energía electromagnética, incluyendo la luz visible que ha interactuado con la superficie de los materiales y la atmósfera. Los sensores remotos ubicados en los satélites miden la radiación electromagnética que ha interactuado con la superficie terrestre. Esta radiación electromagnética se comporta en parte como una onda de energía fluctuante que viaja a la velocidad de la luz, la cual presenta una variación en longitud de onda bastante extensa que usualmente es mostrada en escala logarítmica (figura 1).

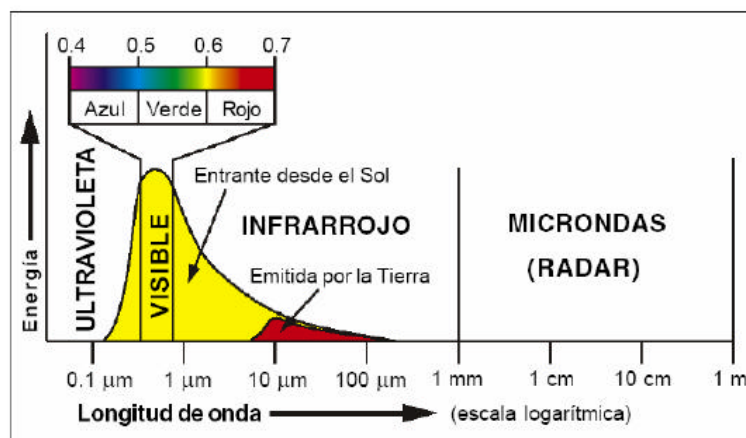


Figura 1.- Radiación electromagnética en función de la longitud de onda. Fuente: Smith, 2001.

La radiación electromagnética proveniente de los rayos solares, al interactuar con la materia, puede cambiar su dirección, intensidad, contenido de la longitud de onda y polarización. La naturaleza de estos cambios depende de la confección química y estructura física de los

materiales expuestos a la radiación electromagnética. Estos cambios proveen, por lo tanto, de los mayores indicios de las características de los materiales de la superficie.

Todos los sistemas de percepción remota diseñados para monitorear la superficie de la Tierra dependen de la energía que es reflejada difusamente o emitida por la superficie. En función de la fuente de radiación electromagnética, los sensores remotos se pueden clasificar en tres categorías: Sensores de radiación solar reflejada, Sensores Infrarrojos Termal y Sensores de imágenes de Radar.

Los sensores de radiación solar reflejada se caracterizan por detectar la radiación solar que ha sido difusamente reflejada hacia arriba de las características de la superficie. Los sensores infrarrojo termal se diferencian de los anteriores porque tienen la capacidad de detectar la radiación infrarroja termal emitida por la superficie, lo que permite conocer información sobre las propiedades termal de los materiales. Por su parte, los sensores de imágenes de radar corresponden a sistemas denominados “activos” ya que iluminan la superficie con la emisión de radiación de microondas, con lo que miden la energía que es difusamente reflejada de regreso al sensor.

Una de las ventajas importantes que ofrece el uso de teledetección es el hecho de poder discriminar diferentes materiales en las imágenes captadas por el sensor remoto. Esto es posible gracias a las firmas espectrales producidas por longitudes de onda dependientes de la absorción del material. Para cuantificar estas firmas espectrales es necesario utilizar una propiedad conocida como reflectividad o reflectancia espectral. Esta corresponde a la razón de la energía reflejada y la energía incidente como una función de la longitud de onda. Para conocer la reflectancia espectral de diversos materiales, es necesario hacer uso de un espectrómetro en el laboratorio o en terreno. Luego, a partir de este instrumento es posible identificar distintos materiales en una imagen satelital analizando su respuesta espectral.

Las características fundamentales de los datos adquiridos en un sistema de percepción remota se dividen en los siguientes tipos de resoluciones: espacial, espectral, temporal y radiométrica. La espacial y temporal no requieren mayor explicación, sin embargo vale la pena consignar que la espectral se refiere a la capacidad que posee un sistema de percepción remota para distinguir diferentes partes del rango medido de longitudes de onda, lo que equivale al número de intervalos de longitudes de ondas o bandas que son medidas, y cuán estrecho es cada intervalo. También es importante señalar que la resolución radiométrica indica los niveles en que se ha discretizado la energía recibida por un detector individual en un sensor.

Entre los principales sistemas satelitales pueden citarse los **Landsat** (puede conseguir una resolución espacial de 15 a 30 metros, resolución temporal de 16 días y capta 7 bandas espectrales entre el rango visible y el infrarrojo termal), **NOAA-AVHRR** (resolución espacial de 1 Km.² por píxel), **MODIS** (*Terra y Aqua*): (capturan datos en 36 bandas espectrales en un rango de longitudes de onda que varían desde los 0,4µm y los 14,4 µm; resoluciones espaciales varían entre los 250, 500 y 1000 m) y **GOES**.

Con respecto a la aplicación de la teledetección en el análisis de sequías, las investigaciones han estado enfocadas principalmente en la obtención de indicadores basados en la reflectividad de la vegetación. El Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Tucker, 1979, citado por Thenkabail, 2004), ha sido el indicador más utilizado en estudios desarrollados en países como España, India, Tailandia, Canadá e Irán entre otros. España, de hecho, a través del laboratorio de Teledetección de Valladolid (Gonzalez-Alonso, 2002), dispuso de un sistema de monitoreo

basado en el NDVI, que a través de imágenes NOAA, permitió estudiar la extensión temporal y espacial de las sequías durante el período 1993-1997. Dado que ya no se captan imágenes NOAA, las imágenes MODIS han sido las más utilizadas actualmente en estudios relacionados con sequías.

Otra aplicación que se puede mencionar corresponde a la obtención de indicadores de humedad a partir de sensores de imágenes de radar. Estas investigaciones, orientadas a estudiar sequías agrícolas, han sido desarrolladas en países como China y Australia (Chenglin et al, 2004).

3. INDICADORES DE SEQUÍAS BASADOS EN EL USO DE TELEDETECCIÓN

La sequía, al tratarse de un fenómeno natural que abarca una gran extensión geográfica y temporal, es susceptible a ser estudiada o monitoreada a través del uso de tecnologías espaciales. Dado que las imágenes satelitales están compuestas por bandas que captan reflectividades para distintas longitudes de onda, es posible utilizar el álgebra de bandas o de imágenes para calcular indicadores que permitan diferenciar o discriminar entre los distintos elementos presentes en la superficie terrestre. El álgebra de bandas se basa en el hecho de que las imágenes son consideradas como matrices, donde cada píxel corresponde al elemento de la matriz o banda en donde se almacena la información.

Las variables que se consideran en este estudio son la cobertura nival y condiciones de la vegetación por lo que para el análisis se usan los indicadores NDSI y NDVI, respectivamente, definidos a base de imágenes captadas por los sensores NOAA (proporcionadas por el Centro de Estudios Espaciales de la Universidad de Chile) y MODIS (obtenidas gratuitamente de la página <http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Ambos tipos de sensores se caracterizan por la obtención de imágenes de baja resolución espacial (500-1000 m) y alta resolución temporal (1-16 días) lo que permite estudiar la evolución de los indicadores de sequías a nivel global desde un punto de vista temporal y geográfico.

Los tipos de productos utilizados y características de las imágenes utilizadas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Tipos de imágenes utilizadas y sus características

Variable	Indicador	Sensor	Tipo de Producto	Período	Nº imag. utilizadas	Resolución temporal	Resolución Espacial (m)	Nº de bandas utilizadas
Cobertura Nival	NDSI	NOAA	-	1997-1999	87	Variable	1000	2
	NDSI	MODIS	Snow Cover	2000-2005	259	8 días	500	1
Vegetación	NDVI	NOAA	-	1997-1999	87	Variable	1000	2
	NDVI	MODIS	Vegetation Index	2000-2005	134	16 días	500 y 1000	1

La herramienta que se utiliza para procesar las imágenes recopiladas es el software ENVI (Environment for Visualizing Images). Los procesos que se utilizan para el tratamiento son: recortes, mosaicos o creación de imágenes compuestas y cálculo de indicadores. Además, para restringir la información que proporciona cada imagen exclusivamente a la zona de interés, se utilizan máscaras construidas a partir de vectores geográficos georreferenciados. Esto permite analizar la información a nivel regional, comunal o de cuencas, según la variable utilizada. La

información obtenida en cada imagen se utiliza para la creación de curvas que permitan analizar la evolución de la cobertura nival y de las condiciones de la vegetación, tanto a nivel espacial (según el tipo de máscara utilizada) como temporal.

Índice de Cobertura Nival

El NDSI (Normalized Difference Snow Index; Tucker, 1979, citado por Hall et al., 2001) es un indicador útil para identificar nieve o hielo y además permite diferenciar estos elementos de la mayoría de las nubes (Hall et al., 2001). Es una medida de la magnitud relativa de la diferencia entre las reflectividades de la nieve entre el rango visible y el infrarrojo cercano de longitudes de onda, como se expresa a través de la ecuación 1.

$$NDSI = \frac{(I_{visible} - I_{NIR})}{(I_{visible} + I_{NIR})} \quad (1)$$

donde $\lambda_{visible}$ es la reflectividad de la nieve en el rango visible y λ_{NIR} es la reflectividad de la nieve en el infrarrojo cercano.

Para cada imagen NOAA seleccionada se calcula el NDSI considerando que la reflectividad en el rango visible queda dada por el canal 1 mientras que el canal 2 representa la reflectividad en el infrarrojo cercano. Al calcular el NDSI para cada imagen, se crea una nueva imagen procesada, en donde cada píxel adquiere un valor numérico que corresponde precisamente al NDSI. Esto constituye el primer paso para lograr una diferenciación entre la nieve y otros elementos. Luego de la aplicación de una máscara regional se calcula la cobertura nival (expresada en km²) para cada imagen. Esto se realiza a través de la elección de valores umbrales del NDSI y mediante la construcción de archivos vectoriales usando ENVI. Estos archivos vectoriales agrupan los píxeles clasificados como nieve dentro de una imagen, lo que finalmente permite determinar la cobertura nival para cada imagen considerada. Se supone que (Dmitriev, 2005) para valores de NDSI = 0,05 un píxel puede ser considerado cubierto por nieve, mientras que para valores de NDSI = 0,03 el píxel se considera libre de ésta.

El NDSI es el indicador en el cual se basa el algoritmo de mapeo de nieve, SNOWMAP (Klein et al 1998) que fue diseñado por el National Snow and Ice Data Center (NDSIC) de Estados Unidos, para identificar la nieve en cada píxel de resolución 500 m, en cada imagen captada por el sensor MODIS. A partir de la utilización de este algoritmo, se producen imágenes a nivel global y en forma diaria desde el año 2000 para todo el globo terrestre. Considerando la identificación de nieve en imágenes diarias, el NDSIC generó un nuevo producto consistente en imágenes que muestran la máxima cobertura de nieve por píxel para períodos de 8 días. Esto significa que un píxel es clasificado como nieve aunque sólo en uno de los 8 días del período haya sido clasificado como tal. Este tipo de producto, llamado MOD10-SNOW COVER, se encuentra disponible en forma gratuita en la página oficial de MODIS y es la fuente de información que se utilizó para analizar la evolución temporal de la cobertura nival en este estudio.

En este caso se descargan imágenes correspondientes al producto MOD10- SNOW COVER y a éstas, al igual que a las imágenes NOAA, se les realiza un tratamiento previo que involucra

recortes y mosaicos, o creación de imágenes compuestas que conforman la totalidad de la superficie en estudio. Luego de la aplicación de máscaras regionales y por cuencas se calcula la cobertura nival en cada imagen compuesta, a través de una clasificación en ENVI. Esto permite determinar el porcentaje de píxeles clasificados como nieve en cada imagen y cuantificar la cobertura nival en km². La cobertura nival obtenida en cada imagen MODIS permite construir una curva que representa la variación temporal de la cobertura nival en la zona en estudio.

Índice de Vegetación

El Normalized Vegetation Index (NDVI) es un indicador de la densidad de vegetación en una cierta zona y que puede ser utilizado para analizar sequías desde el punto de vista agrícola ya que descensos apreciables en este índice podrían significar la presencia de períodos secos. Fue propuesto por Tucker en 1979 (citado por Thenkabail, 2004)) y se calcula según se indica en la ecuación 2:

$$NDVI = \frac{(I_{NIR} - I_{red})}{(I_{NIR} + I_{red})} \quad (2)$$

donde: λ_{NIR} es el valor de reflectancia en el infrarrojo cercano y λ_{red} es el valor de reflectancia en el rojo del rango visible de longitudes de onda.

Para cada imagen NOAA seleccionada se calcula el NDVI utilizando la expresión 2, donde se considera que el valor de reflectancia en el infrarrojo cercano está dado por el canal 2 y el valor de reflectancia en el rango visible, por el canal 1. Al aplicar máscaras regionales y comunales, se calcula el NDVI promedio a dichos niveles, lo que construye curvas representativas de la evolución temporal de las condiciones de vegetación a nivel regional y comunal para el período que se desee.

En cuanto a las imágenes MODIS, se utilizan imágenes correspondientes al producto MOD13-VEGETATION INDEXES que se caracteriza por presentar imágenes cada 16 días, con el NDVI ya calculado. El tratamiento previo de estas imágenes es análogo al indicado para el análisis de la cobertura nival usando imágenes MODIS y su análisis posterior es análogo a lo señalado para el uso de imágenes NOAA en el análisis de las condiciones de vegetación.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO

La IV Región de Coquimbo está ubicada en la zona semi-árida del oeste de Sudamérica, específicamente en el Norte Chico de Chile. Se extiende desde los 29°00' hasta los 32°10' de latitud Sur, y abarca un área de 40.462 km², que equivale al 5,3% del territorio nacional. Limita al norte con el gran desierto de Atacama ubicado en la III Región del país y al sur con la V Región de Valparaíso. El límite Oeste corresponde al Océano Pacífico mientras que el límite Este lo marca la Cordillera de los Andes. La región está dividida administrativamente en tres provincias; Elqui, Limarí y Choapa, entre las cuales se distribuyen 15 comunas como se muestra en la figura 3.

La región de Coquimbo se caracteriza por presentar una zona de transición entre los climas mediterráneos desérticos y los templados mediterráneos. Debido a esta condición se puede

distinguir en la parte litoral de la región una continuación del clima desértico con nublados abundantes hasta aproximadamente los 29°S. De ahí en adelante la zona costera presenta abundante nubosidad y una marcada homogeneidad térmica que va disminuyendo gradualmente hacia el interior. La oscilación térmica diaria no sobrepasa los 6° C. La zona interior de la IV Región presenta un clima que se caracteriza por la ausencia de nubosidad y el aumento de las temperaturas y la oscilación térmica diaria con respecto a la costa. En la cordillera de Los Andes sobre los 3.000m de altitud se presentan altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que constituyen un aporte significativo de agua en el período estival. Las precipitaciones en la IV Región se concentran en los meses de invierno entre los meses de Abril y Agosto. Se caracterizan porque son escasas, lo que se debe a las altas presiones que se dan sobre el océano, que impiden el paso de frentes de lluvia. Esto va disminuyendo hacia el sur de la región, por lo que las precipitaciones se van incrementando.



Figura 3: Zona de aplicación. IV Región de Coquimbo

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Cobertura Nival

Utilizando las imágenes NOAA, a partir de valores umbrales del NDSI se seleccionaron los píxeles clasificados como nieve, lo que permitió crear un archivo vectorial por cada imagen conteniendo las zonas clasificadas como nieve. En el caso de la figura 4 se visualizan las diferencias de cobertura nival que se obtienen al adoptar distintos valores umbrales.

De las coberturas obtenidas se extrae la evolución temporal de la nieve en la IV Región, tal como se presenta en la figura 5. Se observa que pese a la diferencia entre las magnitudes de la cobertura nival calculadas para distintos NDSI umbrales, ésta presenta una tendencia similar en el tiempo. Destaca el alza notable en Agosto de 1997 y el descenso en el período 1998-1999, independiente

del nivel umbral, donde pese a la gran diferencia de magnitudes, el año 1998 presenta una baja considerable en la cobertura nival.

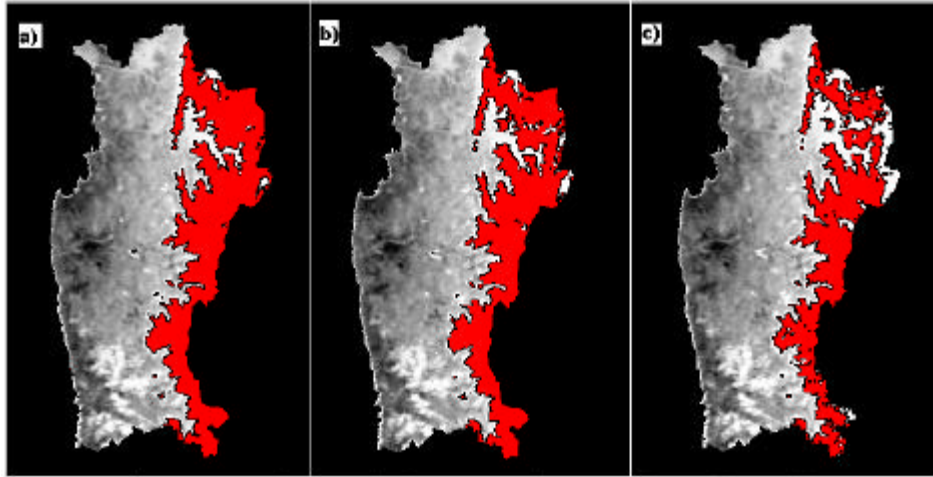


Figura 4: Cobertura nival para NDSI min= 0.08 (a); 0.09 (b) y 0.1(c).

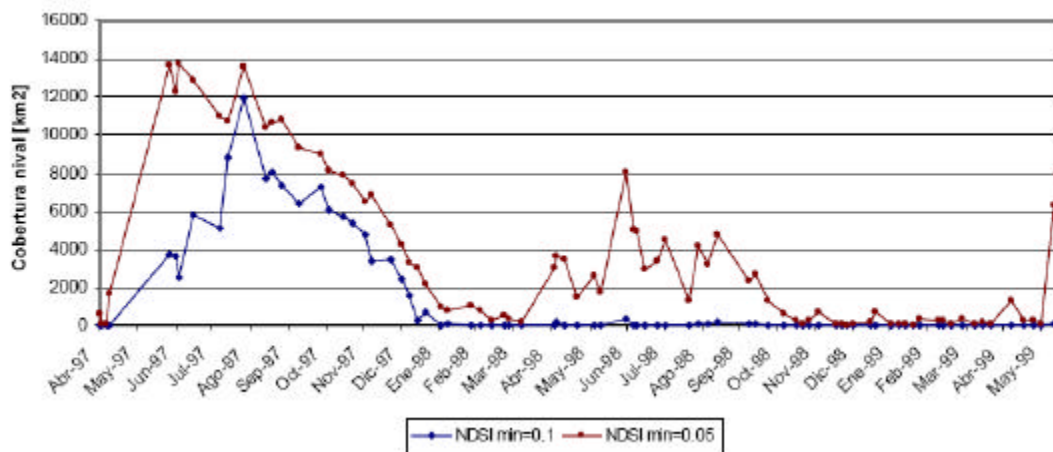


Figura 5: Evolución de la cobertura nival en la IV región para NDSI umbrales de 0.05, 0.1. Imágenes NOAA.

La figura 6 muestra un ejemplo de clasificación no supervisada utilizando una imagen MODIS. En rojo se observa la zona clasificada como ausente de nieve mientras que en verde se obtiene la zona clasificada como nieve. El programa entrega el porcentaje de píxeles correspondiente a cada clase, a base de lo que se determina el área de la región cubierta por nieve y su evolución como se exhibe en la figura 7.

Dado que los datos presentan oscilaciones importantes, se aplicó una media móvil (cada 4 datos) con el objetivo de reducirlas. Observando el gráfico de la figura 7 y como era de esperar, la cobertura nival responde a una periodicidad clara regulada por las estaciones del año. Aproximadamente entre Julio y Agosto de cada año, el área cubierta por nieve presenta un

máximo producto de las precipitaciones invernales, mientras que en primavera y verano, la cobertura nival empieza a decaer producto del deshielo natural. Se observa que el año 2002 es el que presenta una mayor cobertura de nieve al superar los 10.000 km², mientras que el 2004 es el que presenta la menor (~ 7000 km²).

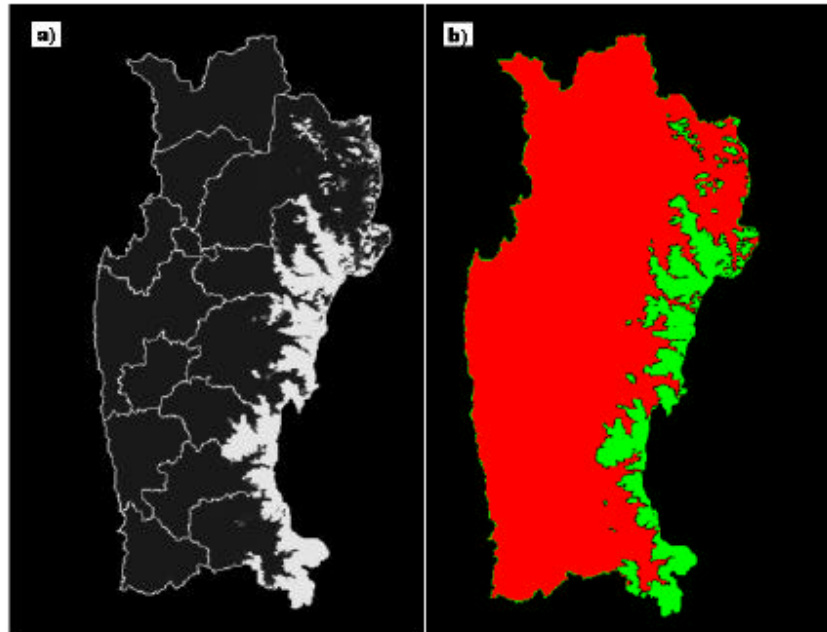


Figura 6: (a) Imagen descargada del NDISC a la cual se aplicó la máscara regional (b) Imagen postclasificación correspondiente al día 265 del año 2000

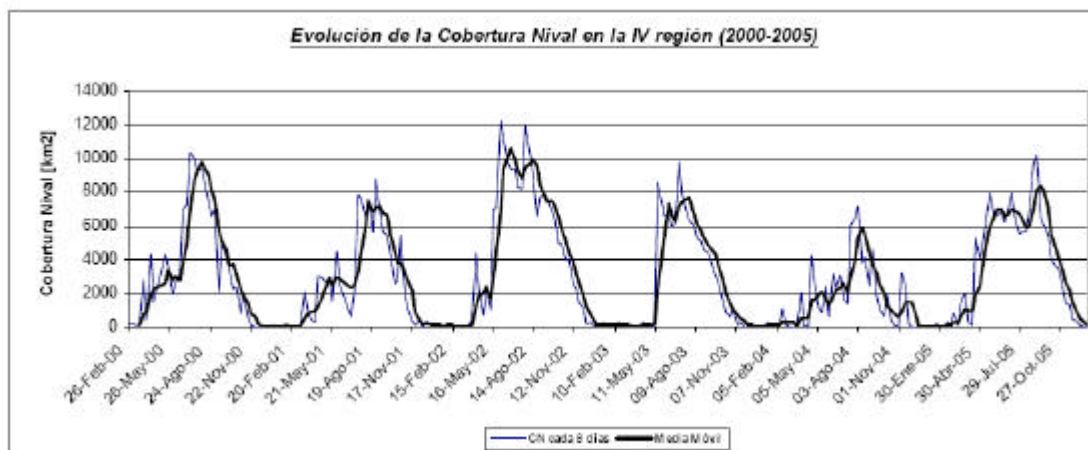


Figura 7: Evolución del área cubierta por nieve en la IV Región.

Al comparar los resultados obtenidos entre ambas imágenes, se aprecia que el uso de imágenes MODIS ofrece una estimación mejor de la cobertura nival, dado que ésta es calculada a partir de imágenes previamente procesadas. Se observa también que las bajas magnitudes de la cobertura

nival del año 1998 (NOAA) no se repiten en el período 2000-2005, lo que sugiere la posible ocurrencia de un evento seco en dicho año.

Condiciones de Vegetación

De imágenes NOAA como la mostrada en la figura 8, es posible discriminar vegetación por sobre los otros elementos, lo que se comprueba al apreciar claramente las zonas dedicadas a la agricultura de riego en la zona en color blanco (NDVI ~ 0,1).

También se aprecia el embalse La Paloma (los cuerpos de agua y la nieve se presentan oscuros), que se distingue por presentar un NDVI muy bajo (NDVI ~ - 0,05). Luego de aplicar la máscara regional se obtuvo el valor promedio en toda la región, generándose, posteriormente, la figura 9 que muestra la evolución temporal de dicho índice. Se observa que el NDVI promedio no sigue una tendencia o comportamiento claro, presentando continuas fluctuaciones lo que no permite determinar una variación clara entre las estaciones del año. En Agosto de 1997 se presenta un peak del NDVI promedio a nivel regional, lo que podría deberse a las intensas precipitaciones registradas dicho año.

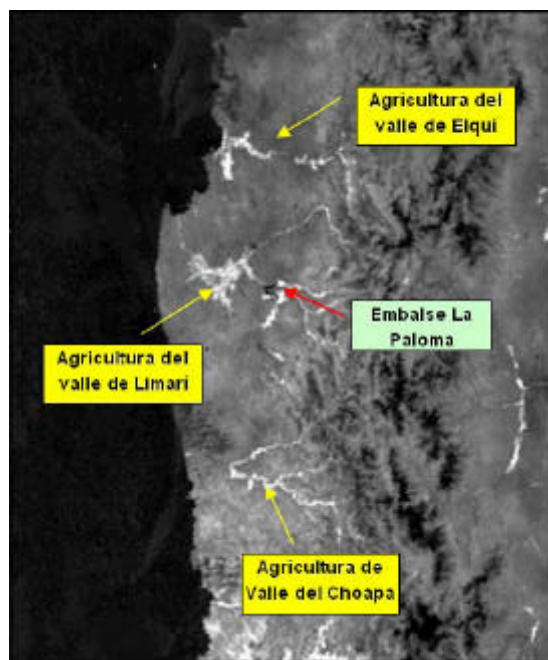


Figura 8: Imagen NDVI del día 6/11/98

El comportamiento del NDVI promedio en las comunas costeras y centrales (asociadas a actividades agrícolas de riego y secano) de la región es similar al NDVI promedio a nivel regional, observándose que en las comunas ubicadas al sur de la región el NDVI es mayor en relación a las comunas ubicadas más al norte. En todas las comunas se observa un peak en Septiembre de 1997, para luego empezar a decaer para mantenerse bordeando un valor de 0,01 a 0,02 el resto del período, presentando una diferencia notable con respecto al peak ocurrido el año 1997. El descenso sugiere que podría haberse estado frente a un período de sequía a partir de

1998, sin embargo, no es posible establecer a priori esta suposición pues no se tiene un período de análisis lo suficientemente largo.

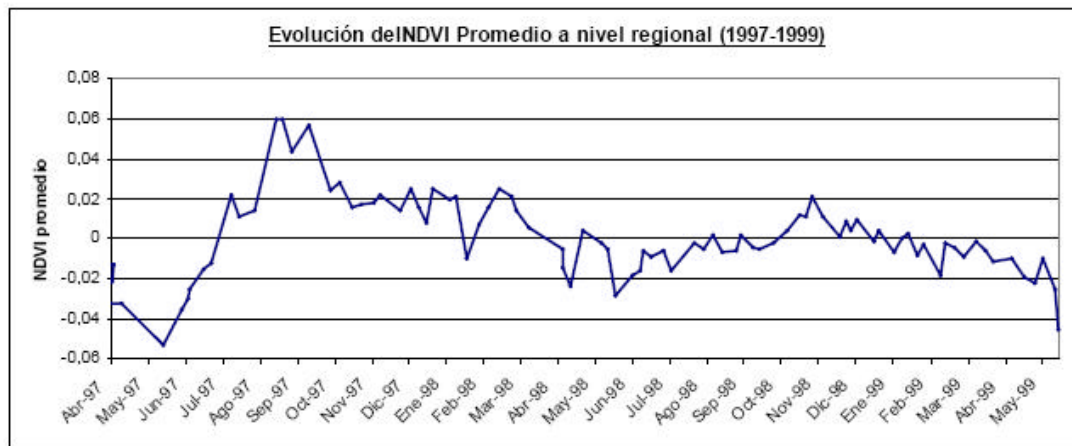


Figura 9: Evolución del NDVI Promedio a nivel regional (1997-1999) (NOAA)

Por otra parte, las imágenes MODIS procesadas y tratadas, permiten también evaluar el NDVI regional o comunal ya sea para niveles diarios o mensuales, como se muestra en la figura 10, y calcular la evolución temporal del índice a niveles regionales o comunales como se aprecia en la figura 11.

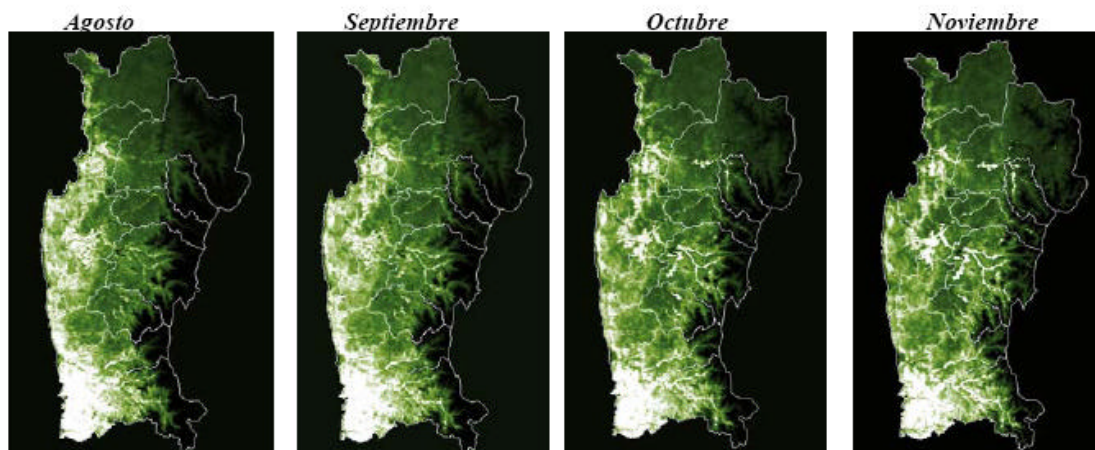


Figura 10: Imágenes promedio NDVI a nivel mensual (MODIS)

A diferencia de lo acontecido con las imágenes NOAA, estos gráficos permiten observar claramente el comportamiento estacional que presenta el NDVI promedio a nivel comunal. En las comunas costeras y centrales, este comportamiento se distingue por ser de carácter periódico con un período anual, en donde el peak se produce en los primeros meses de primavera, generalmente en el mes de septiembre. Por su parte, en los meses de verano el indicador presenta un descenso notable, el cual empieza a crecer a partir de Junio aproximadamente. En las comunas cordilleranas como Vicuña, el NDVI presenta un comportamiento periódico, sin embargo a

diferencia del resto de las comunas costeras y centrales, el NDVI decae en primavera producto de la acumulación de nieve. El NDVI tiende a aumentar hacia el sur del región, lo que se justifica principalmente con las condiciones de vegetación en la comuna de Los Vilos, que se caracteriza por superar valores de 0,6.

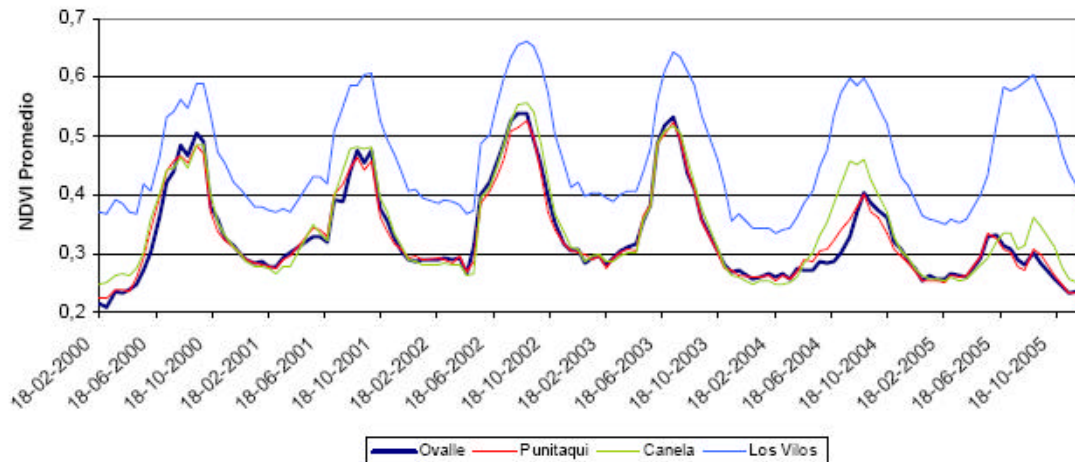


Figura 11: Evolución del NDVI promedio por comunas (MODIS)

El cálculo del NDVI por imagen permite crear un sistema que podría ser útil para la identificación visual de sequías a partir del supuesto de establecer condiciones de vegetación promedios en una época dada, las que al ser usadas como referencia hacen posible cuantificar porcentualmente la diferencia entre éstas y las condiciones de vegetación de un día cualquiera. Un ejemplo de aplicación se muestra en la figura 12 donde se generaron imágenes para los primeros meses del 2005. Se observa que en la zona cordillerana norte se obtienen valores bajo el promedio, lo que podría significar la presencia de una ligera sequía.

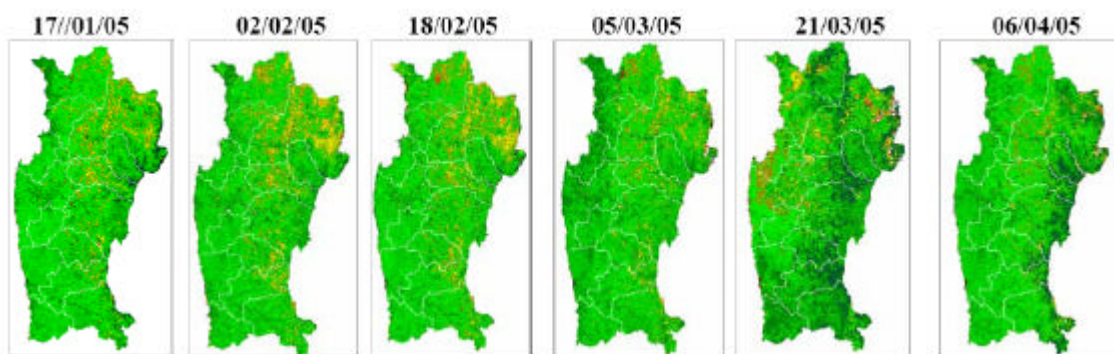


Figura 12.- Ejemplo de método de identificación de sequías

A diferencia de la cobertura nival, en donde los resultados obtenidos al usar imágenes NOAA y MODIS son comparables, en este caso la densidad de vegetación, medida a través del NDVI, no es comparable. Esto se explica porque básicamente los sensores remotos AVHRR y MODIS presentan características distintas, lo que se traduce en valores distintos del NDVI. De hecho, en las imágenes NOAA, las zonas agrícolas de riego presentan valores del orden de 0,1 mientras que, en las mismas zonas, el NDVI varía entre 0,3 y 0,5, para imágenes provenientes del sensor MODIS. Con fines de establecer un registro continuo del NDVI entre los años 1997 y 2005,

debería contarse con imágenes NOAA del período 2000-2001, único período común en el que funcionaron los sensores AVHRR y MODIS, y establecer correlaciones entre el NDVI de uno y otro sensor.

6. CONCLUSIONES

En general, el uso de teledetección a partir de imágenes satelitales NOAA y MODIS, permitió desarrollar indicadores y métodos que pueden ser útiles en un sistema de evaluación y monitoreo de sequías. Sin embargo, éstos están sujetos a ser comprobados y puestos a prueba en un período real de sequía. Dado que el registro de imágenes fue escaso y discontinuo, sólo fue posible interpretar a través de los indicadores, la sequía acontecida entre 1998 y 1999, comprobando solamente la validez de la cobertura nival como indicador.

El uso de la teledetección representa una ventaja con respecto a la tecnología convencional pues al tener una visión global de cierta zona y la gran cantidad de herramientas con las que cuentan los softwares ligados al área de la interpretación de imágenes satelitales, permite llevar a cabo múltiples aplicaciones que resultan fundamentales para desarrollar eficientemente estudios e investigaciones ligadas al área de de ingeniería y ciencias.

Con respecto a la calidad de la información satelital en general, se considera que las imágenes MODIS de 500 m de resolución espacial, se adaptan bien al análisis de sequías ya que permiten visualizar en forma global la IV Región y además poseen una alta resolución temporal.

REFERENCIAS

Chenglin, L., Bingfang W., Yichen T., Wenbo X. y Jianxi H. 2004. Crop drought monitoring using serial NDVI & NDWI in Northern China. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9436/29947/01369735.pdf>

Dmitriev, V. 2005. The determination of wind pollution zone around city Omsk by using NOAA data. 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE-31), Saint Petersburg, June 20 – 24, 2005. CD-ROM, 4 pages.

González-Alonso, F., 2002 Drought Monitoring in Spain using Satellite Remote Sensing Techniques during the period 1987-2001. Madrid, España.

Hall, D., Riggs G. A. y V. Salomonson, 2001. Algorithm Theoretical Basis Document for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms, Septiembre. <http://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/atbd.html>

ONU- Convención de Lucha contra la Desertificación. 1994

Riggs, G., 2004 Snow Mapping with the MODIS Aqua instrument. Eastern Snow Conference, Portland, Maine, USA.

Salomonson, V., 2006. Development of the Aqua MODIS NDSI Fraccional Snow Cover Algorithm and validation results. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Julio 2006.

Smith, R., 2001 Introducción a la Percepción Remota del Ambiente. Agosto. http://www.microimages.com/i18n/es_spanish/es_introrse.pdf

Thenkabail, P., 2004. The Use of Remote Sensing Data for Drought Assesment and Monitoring in Southwest Asia. International Water Management Institute.