



**COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO**

**“DETERMINACIÓN DE SUPERFICIE REGADA, TIPOS DE CULTIVOS Y  
DEMANDA HÍDRICA MEDIANTE IMÁGENES HIPERESPECTRALES:  
ESTUDIO DE CASO EN LA CUENCA DEL RÍO CLARO DE RENGO”**

**INFORME FINAL**

**SANTIAGO, JULIO DE 2012**

**CENTRO DE ECOLOGÍA APLICADA LTDA.**

**AV. SUECIA 3304, ÑUÑO A – SANTIAGO**

**Fono: 56 2-2741872 e-mail: cea@cea.cl**

## INDICE

|                 |                                                                       |                  |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><u>1</u></b> | <b><u>INTRODUCCIÓN</u></b>                                            | <b><u>1</u></b>  |
| 1.1             | EL USO DE LA TELEDETECCIÓN                                            | 2                |
| <b><u>2</u></b> | <b><u>OBJETIVOS DEL ESTUDIO</u></b>                                   | <b><u>5</u></b>  |
| 2.1             | OBJETIVO GENERAL                                                      | 5                |
| 2.2             | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                                                 | 5                |
| <b><u>3</u></b> | <b><u>REVISIÓN DE ANTECEDENTES</u></b>                                | <b><u>6</u></b>  |
| 3.1             | UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO                                             | 6                |
| 3.2             | RELIEVE                                                               | 7                |
| 3.3             | GEOLOGÍA                                                              | 7                |
| 3.4             | AGUAS SUBTERRÁNEAS                                                    | 8                |
| 3.4.1           | FORMACIONES ACUÍFERAS                                                 | 8                |
| 3.4.2           | PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO                                        | 9                |
| 3.4.3           | PROPIEDADES HIDRÁULICAS                                               | 9                |
| 3.5             | RECURSOS HÍDRICOS Y RIEGO                                             | 9                |
| 3.5.1           | RÍO CLARO DE RENGO                                                    | 10               |
| 3.5.2           | RÍO CACHAPOAL                                                         | 10               |
| 3.5.3           | OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA EN LA ZONA DE ESTUDIO                        | 11               |
| 3.6             | CALIDAD DE AGUAS                                                      | 14               |
| 3.7             | REFLECTANCIA DE CULTIVOS                                              | 15               |
| 3.8             | NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS                                  | 19               |
| 3.8.1           | EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA ( $ET_0$ )               | 20               |
| 3.8.2           | COEFICIENTE DE CULTIVO ( $K_c$ )                                      | 21               |
| 3.8.3           | EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR ( $ET_c$ ) | 22               |
| 3.8.4           | EFICIENCIA DEL RIEGO                                                  | 23               |
| <b><u>4</u></b> | <b><u>METODOLOGÍA DE TRABAJO</u></b>                                  | <b><u>24</u></b> |
| 4.1             | ENFOQUE MULTIESPECTRAL TEMPORAL CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT      | 25               |
| 4.2             | ENFOQUE HIPERESPECTRAL ESPACIAL CON IMAGEN AEROTRANSPORTADA           | 29               |
| 4.2.1           | LEVANTAMIENTO CONDICIÓN ESCENA 1 Y 2                                  | 30               |

|          |                                                                                  |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.2    | CORRECCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES                                          | 33        |
| 4.2.2.1  | Corrección Radiométrica                                                          | 33        |
| 4.2.2.2  | Corrección Geométrica                                                            | 33        |
| 4.2.2.3  | Corrección Iluminación                                                           | 34        |
| 4.3      | LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE CAMPO                                            | 37        |
| 4.3.1    | LEVANTAMIENTO RADIOMÉTRICO                                                       | 39        |
| 4.3.2    | LEVANTAMIENTO DE REFLECTANCIA DE CONTROL                                         | 40        |
| 4.4      | USO DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA                                                | 41        |
| 4.5      | EVALUACIÓN DE RESULTADOS                                                         | 41        |
| 4.6      | MODELO DE CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE CULTIVOS                                     | 42        |
| 4.7      | ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE BAJO RIEGO Y ÁREAS CULTIVADAS POR TIPO DE CULTIVO    | 44        |
| 4.8      | ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR TIPO DE CULTIVO                                | 44        |
| <b>5</b> | <b>ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>                                                     | <b>46</b> |
| 5.1      | ANÁLISIS MULTIESPECTRAL TEMPORAL CON IMÁGENES SATELITALES                        | 46        |
| 5.1.1    | EXPLORACIÓN DE DATOS                                                             | 46        |
| 5.1.2    | FIRMAS TEMPORALES Y CLASIFICACIÓN                                                | 47        |
| 5.1.2.1  | Maíz                                                                             | 47        |
| 5.1.2.2  | Tomate                                                                           | 48        |
| 5.1.2.3  | Alfalfa                                                                          | 49        |
| 5.1.2.4  | Vid - Uva de mesa                                                                | 50        |
| 5.1.2.5  | Vid – Viña                                                                       | 51        |
| 5.1.2.6  | Frutales hoja caduca (Almendro, Cerezo, Ciruelo, Durazno, Manzano, Nogal, Peral) | 52        |
| 5.2      | ANÁLISIS HIPERESPECTRAL ESPACIAL CON IMAGEN AEROTRANSPORTADA                     | 54        |
| 5.2.1    | EXPLORACIÓN DE DATOS                                                             | 54        |
| 5.2.2    | FIRMAS ESPECTRALES Y CLASIFICACIÓN                                               | 56        |
| 5.3      | EVALUACIÓN DE RESULTADOS                                                         | 57        |
| 5.4      | MODELO DE CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE CULTIVOS                                     | 58        |
| 5.5      | ESTIMACIÓN DE ÁREA Y TIPOS DE CULTIVO                                            | 60        |
| 5.6      | ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR TIPO DE CULTIVO                                | 61        |
| 5.6.1    | ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR ÁREA DE ESTUDIO                                | 61        |
| 5.6.2    | ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR SECCIÓN DE RIEGO                               | 64        |
| 5.6.2.1  | Sección Nº1 del río Cachapoal                                                    | 68        |
| 5.6.2.2  | Sección Nº1 y Nº2 del río Claro de Rengo                                         | 71        |
| 5.6.3    | ÍNDICES VEGETACIONALES                                                           | 75        |
| 5.7      | USO DE ENERGÍA PARA EL RIEGO                                                     | 77        |
| 5.8      | COMPARACIÓN DE LAS TÉCNICAS MULTIESPECTRAL E HIPERESPECTRAL                      | 86        |

**6 CONCLUSIONES** **88**

---

**7 BIBLIOGRAFÍA** **90**

---

**Listado de Planos:**

1. Mosaico hiperespectral Falso color
2. Mosaico hiperespectral Color verdadero
3. NDVI Multiespectral (multitemporal)
4. Catastro frutícola por especie
5. Clasificación de tipo de cultivos
6. Demanda hídrica de tipos de cultivos en período inicial (sept-oct)
7. Demanda hídrica de tipos de cultivos en período s de máxima demanda (Dic-Ene)
8. Índice de Estrés Agrícola (basado en Índice NDVI de Vegetación, Índice de WBI banda de agua e Índice PRI de Reflectancia Fotoquímica)
9. Mosaico hiperespectral Falso color (2º vuelo hiperespectral)
10. Mosaico hiperespectral Color verdadero (2º vuelo hiperespectral)
11. NDVI Vuelo N°1 y N°2
12. Detección de cambios NDVI, Vuelo N°1 y N°2

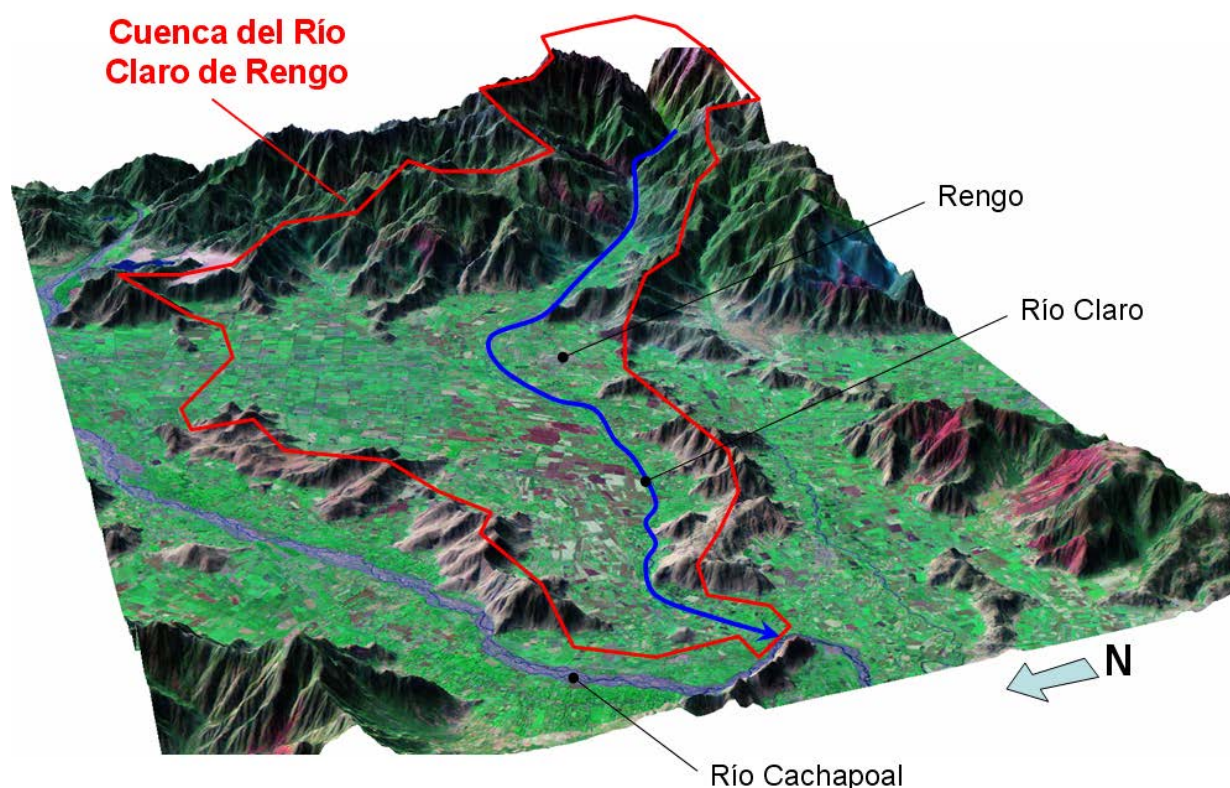
## 1 INTRODUCCIÓN

La Comisión Nacional de Riego (CNR) en su rol de asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país, se ve enfrentada a buscar una metodología de estimación de la demanda y disponibilidad de recursos hídricos, lo cual se dificulta debido a la falta de información actual para conocer la demanda de agua para uso agrícola. La información relacionada con la estimación de superficies de regadío y la demanda de agua en un territorio, es parte de la información básica que se requiere para incrementar el área de riego, mejorar el abastecimiento de agua en las superficies regadas en forma deficitaria, y mejorar la calidad y la eficiencia de la aplicación del agua de riego. Por ejemplo, actualmente la fuente de información primaria que se utiliza para la estimación de la demanda hídrica proviene del Censo Agropecuario (INE, 2007), el cual se realiza a nivel de distrito censal y comunal cada 10 años. Esta condición genera una brecha de tiempo en la cual la información proveniente del Censo puede quedar desactualizada, debido al dinamismo en la rotación de cultivos de algunas cuencas.

Para aumentar el grado de conocimiento en la aplicación de nuevas metodologías que permitan apoyar la función de la CNR en esta materia, se ha solicitado al Centro de Ecología Aplicada realizar un estudio para determinar la superficie regada, identificar tipos de cultivos y estimar la demanda hídrica mediante el uso de técnicas de percepción remota.

El área de estudio seleccionada corresponde a la cuenca del río Claro de Rengo ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Esta región tiene una superficie de 16.311 km<sup>2</sup>, equivalentes al 2,2% del territorio nacional, sin considerar a la Antártica Chilena. El clima es templado de tipo mediterráneo con veranos cálidos e inviernos fríos y lluviosos. En cuanto a sus actividades económicas, es importante en la exportación de cobre y sus derivados; sin embargo, aprovechando sus ventajas comparativas de distancia, calidad de suelos e irrigación, se ha transformado en una región agroindustrial por excelencia (Sánchez y Morales, 2004).

La cuenca del río Claro de Rengo (**Figura 1.1**), se encuentra delimitada por el oriente por la precordillera y cordillera de los Andes; por el norte y sur limita con sendas cadenas de cerros que tienen orientación oriente-poniente; y por el poniente, limita con la confluencia con el río Cachapoal. La actividad agropecuaria en Rengo y Malloa esta caracterizada por la presencia de industrias procesadoras de productos hortícolas y frutales. En la localidad de Malloa, el complejo agroindustrial elabora concentrado de tomate y fruta que tienen una amplia distribución nacional. El nivel tecnológico alcanzado por esta industria, asegura productos altamente competitivos a nivel internacional (Sánchez y Morales, 2004).

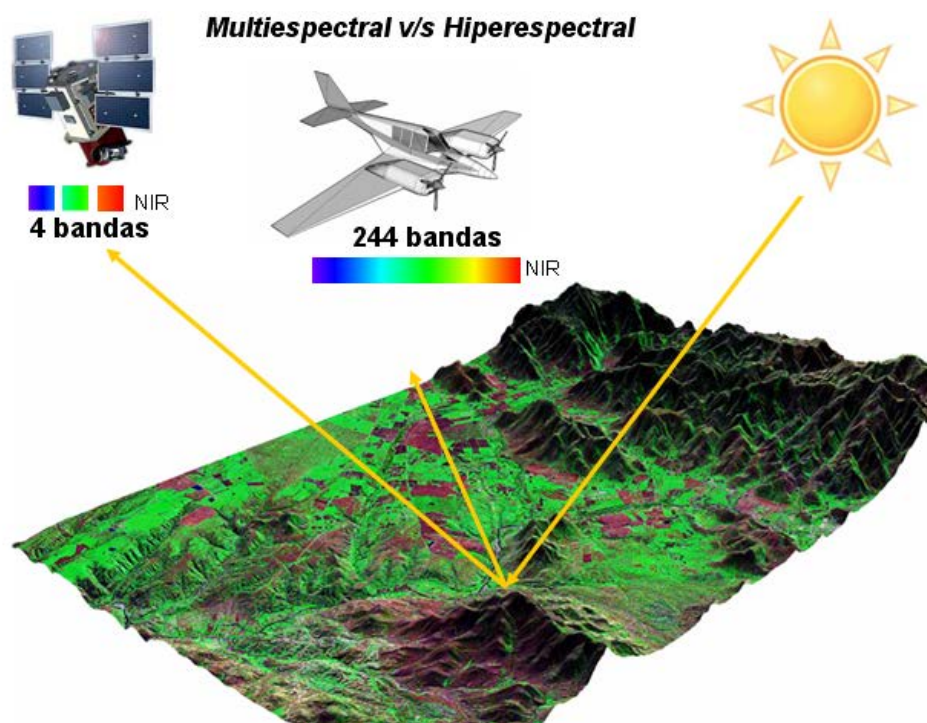


**Figura 1.1.** Área de estudio, cuenca del río Claro de Rengo.

### 1.1 El uso de la Teledetección

Actualmente, la incorporación de nuevas tecnologías de observación, han permitido considerar a la teledetección como una herramienta de gran utilidad para proporcionar información en el área de agricultura, medioambiente y recursos naturales.

La teledetección es la técnica que mediante la adquisición de imágenes a distancia permite obtener información de la superficie de la tierra sin contacto con ella (**Figura 1.2**). Utiliza las propiedades físicas de los objetos observados, en particular sus propiedades ópticas. La teledetección engloba todo el proceso que consiste en captar y registrar la energía del espectro electromagnético emitida o reflejada por los objetos y el tratamiento y análisis de la información. Además, brinda la posibilidad de ir más allá de lo estructural y describir aspectos funcionales de los sistemas ecológicos, particularmente a nivel de ecosistemas.

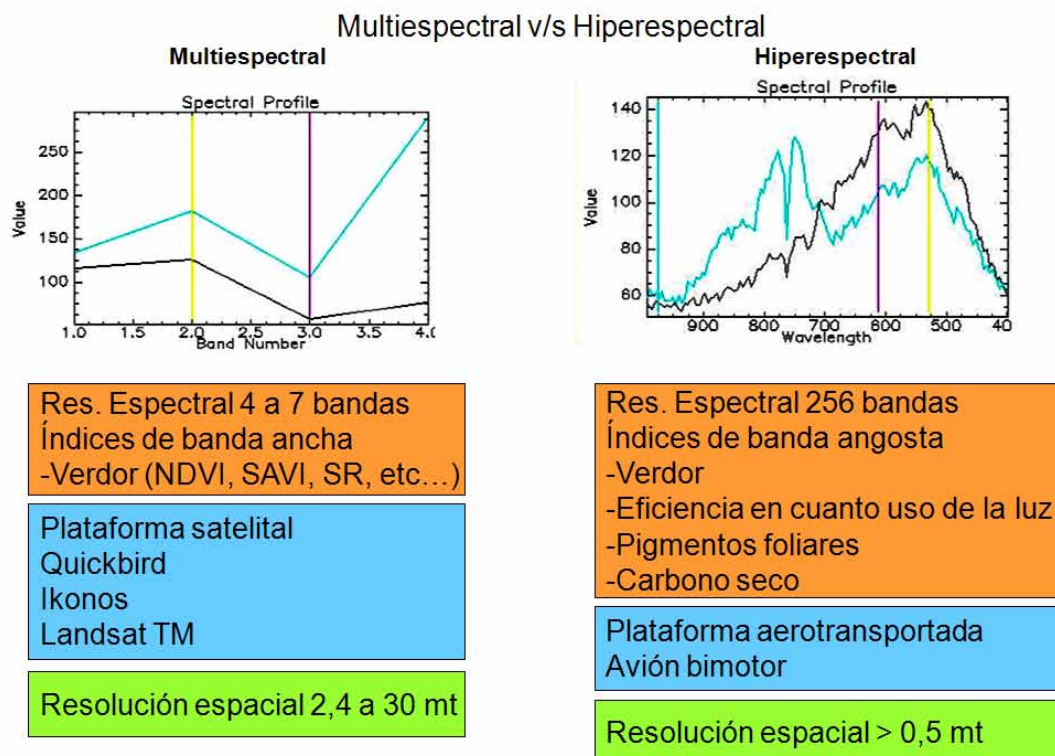


**Figura 1.2.** Adquisición de información con métodos de teledetección Multispectral e Hiperespectral.

El uso de imágenes teledetectadas puede servir como apoyo para la gestión y planificación de esquemas de manejo, cuando se combina con otro tipo de información. Además, su utilización puede ser una alternativa viable y rápida de acceder a información espacial extensa de lugares inaccesibles, haciendo de la percepción remota una herramienta invaluable para la identificación de diferentes elementos de la superficie terrestre.

Entre las diferentes formas de obtener información teledetectada, existe una característica relacionada con la resolución espectral de los sensores ópticos, que determina el número de bandas en las cuales se puede dividir el espectro electromagnético. Las bandas más usuales que están disponibles en plataformas satelitales Multispectrales tienen entre 4 a 7 bandas (por ej: Quickbird, Ikonos, Landsat) que permiten calcular índices espectrales de banda ancha para la estimación de las características de verdor de la vegetación (índices NDVI, SAVI, SR, etc.). En tanto, los sensores Hiperespectrales son capaces de captar más de 200 bandas del espectro electromagnético, pudiendo registrar firmas espectrales continuas. Esto permite la aplicación de otros índices asociados a los estados de salud de la vegetación y algunas características esenciales de los recursos hídricos.

La comparación de firmas y características de las técnicas multispectrales e hiperespectrales se muestran en la **Figura 1.3**.



**Figura 1.3.** Comparación de firmas y características de las técnicas multispectrales e hiperespectrales.

## **2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

### **2.1 Objetivo General**

El objetivo general del estudio es determinar la superficie bajo riego, los principales tipos de cultivos relacionados y la demanda hídrica asociada a ellos en la cuenca Río Claro de Rengo, mediante la aplicación de técnicas de teledetección hiperespectral.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

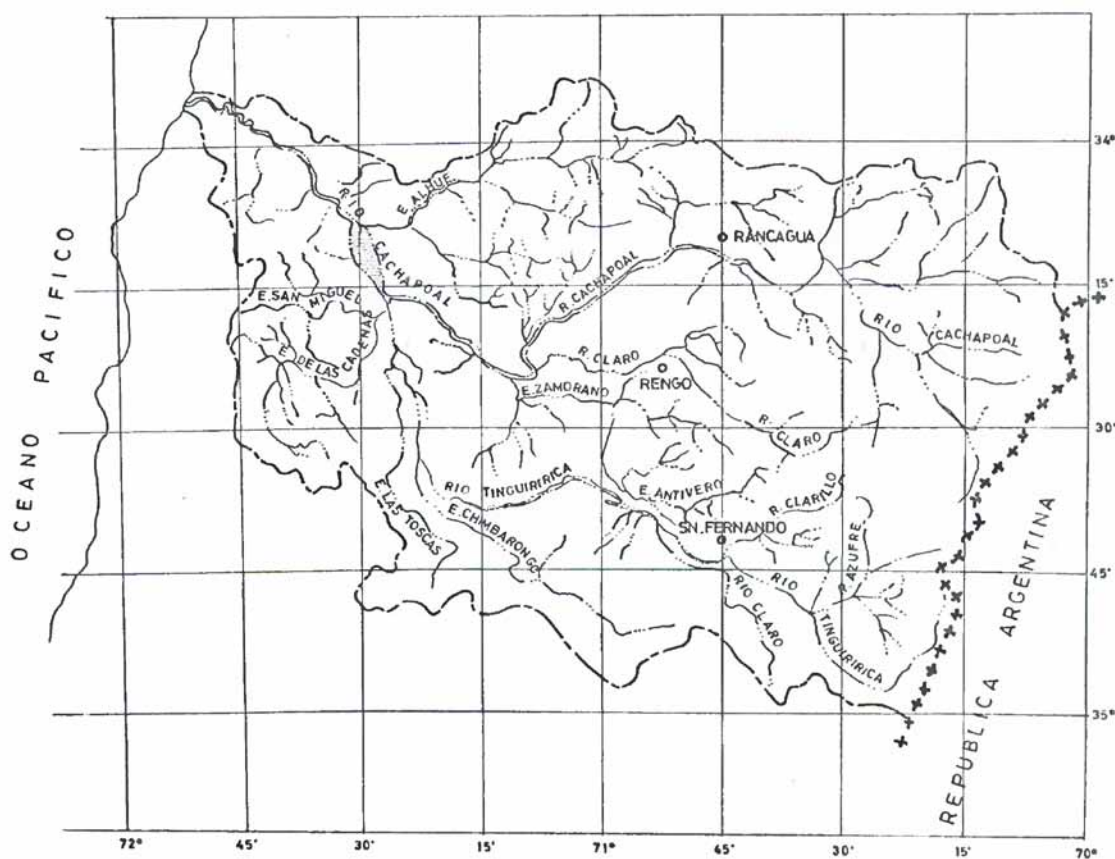
- a) Cuantificar la superficie bajo riego en la cuenca de estudio mediante el uso de imágenes hiperespectrales, con al menos dos escenas para el territorio (enero y marzo 2012) en la temporada de riego 2011-2012.
- b) Identificar y cuantificar los principales rubros o tipos de cultivos en la superficie de riego, a través de una clasificación supervisada de las imágenes hiperespectrales de la cuenca de estudio.
- c) Estimar la demanda hídrica asociada a las áreas de riego y para cada rubro identificado, comparando las dos escenas consideradas de la temporada de riego 2011-2012.
- d) Identificar diferencias en el levantamiento de información para el subsector riego, entre distintas técnicas multiespectrales y la hiperespectral, con los beneficios y costos estimativos asociados, así como, las aplicaciones y análisis que se pueden realizar con ambas técnicas.

### 3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

### 3.1 Ubicación Zona de Estudio

El río Claro de Rengo nace en la precordillera de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins a 45 km al oriente de la ciudad de Rengo, en la laguna Los Cristales, la cual es alimentada desde glaciares de la vertiente oeste de la Sierra Los Punzones, y laguna Negra (DGA, 1984; 1985). La cuenca posee un área de 982 km<sup>2</sup> (DGA, 1996) y drena el valle central, entre el río Cachapoal, al norte, y el estero Zamorano, al sur. Luego de 74 km de recorrido desde su nacimiento, desemboca en el río Cachapoal, cerca de la ciudad de Peumo (localidad de Pueblo Zúñiga) y aguas arriba del embalse Rapel, en las coordenadas UTM 304.489 E y 6.191.534 N (WGS84, H19) (DGA, 1985).

Varios esteros de curso breve son tributarios del río Claro de Rengo, entre los que destacan los esteros Popeta, Boldo y Pichiguelo (DGA, 1985). La **Figura 3.1** muestra la ubicación relativa de la cuenca en el contexto de la región y los principales cursos de agua.



**Figura 3.1.** Cuenca del río Claro de Rengo (Fuente: DGA, 1984).

### 3.2 Relieve

La comuna de Rengo se inserta dentro de las unidades morfo-estructurales de relieve denominadas precordillera y depresión intermedia. En ellas se desarrollan unidades menores de geoformas como conos de deyección y cerros islas (IMR, 2006). Estas formas se asientan sobre rocas cristalinas del batolito andino en los sectores precordilleranos y sobre materiales sedimentarios de origen fluvial, glacial y cenizas volcánicas en la Depresión Intermedia (IMR, 2006).

Se observan dos grandes conos de deyección en la comuna: los conos de los ríos Cachapoal y Claro, que se extienden desde la precordillera hacia el oriente de la Depresión Intermedia, aportando material sedimentario provenientes de los sectores precordilleranos, cuya evolución a través del tiempo ha generado el desarrollo posterior de los suelos de la Cuenca de Rancagua (IMR, 2006).

En el sector nororiental de la precordillera de la comuna de Rengo sobresalen las siguientes cumbres: Cerro La Bandera (2.284 msnm), Cerro Colorado (2.178 msnm), Cerro Portezuelo (2.414 msnm) y Cerros Las Llaletas (2.535 msnm) (IMR, 2006). Mientras al Suroriente de la comuna aparecen como las principales cumbres: Los Altos del Cepillo (3.125 msnm), Cerro Alto del Sapo (3.052 msnm), Cerro Alto del Diablo (2.780 msnm) y Cerro Alto de la Laguna (3.626 msnm) (IMR, 2006).

### 3.3 Geología

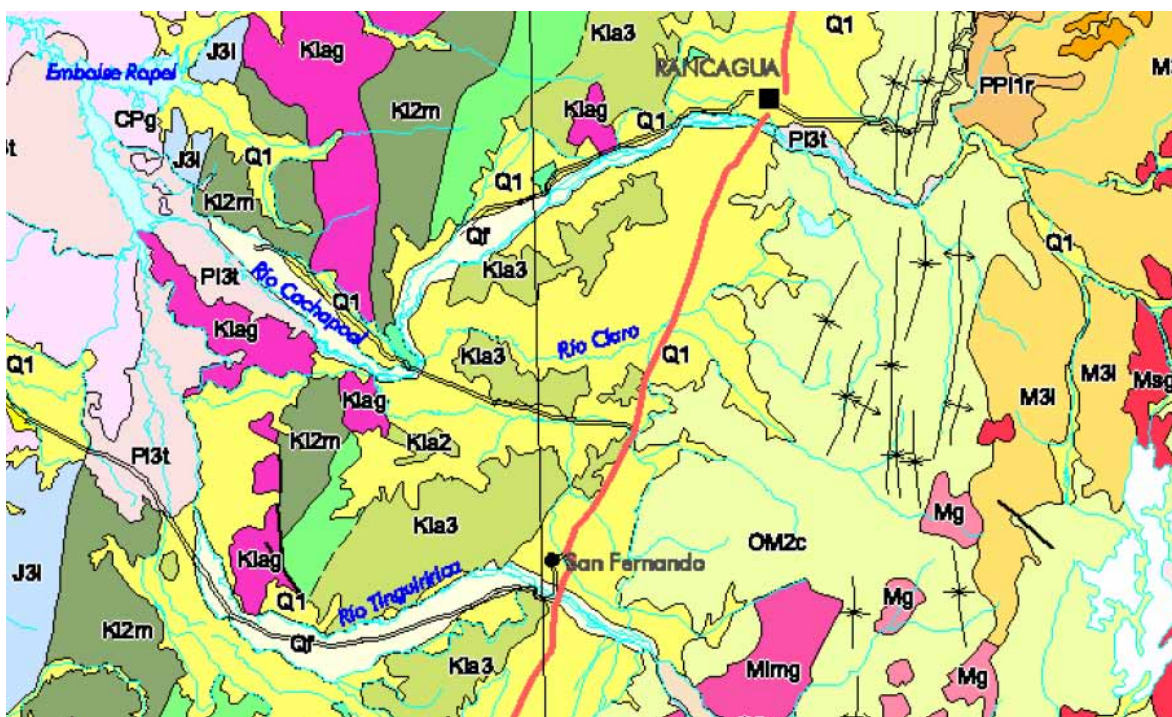
En base al Mapa Geológico de Chile (SERNAGEOMIN, 2003), se presenta la descripción geológica de la cuenca del río Claro de Rengo **Figura 3.2**.

La cuenca del río Claro de Rengo nace a los pies de la formación M3i, que corresponde a complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas, sin que esta formación forme parte de la cuenca. El límite entre la formación M3i y OM2c marca la divisoria de aguas donde se observa el nacimiento del río Claro de Rengo.

La mayor parte de la cabecera de la cuenca se encuentra bajo la clasificación OM2c, que corresponde a una secuencia volcano-sedimentaria compuesta por lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. Dentro de esta secuencia volcano-sedimentaria se observa una formación de roca intrusiva (Mg) donde se ubica el embalse Los Cristales. Esta roca intrusiva pertenece al Mioceno (18-6 Ma) y está formada por granodioritas, dioritas y tonalitas.

Hacia aguas abajo, en el valle central y hasta la junta con el río Cachapoal, la cuenca del río Claro de Rengo está conformada principalmente por la secuencia sedimentaria Q1, que corresponde a depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa. En menor proporción podrían encontrarse depósitos fluvioglaciares, dada la ubicación del nacimiento de este cauce.

En el valle central donde drena esta cuenca, también es posible encontrar cerros islas que corresponden a la formación Kia2, si se considera el color, antes que la etiqueta incluida en la **Figura 3.2**, como indicador de la formación geológica correspondiente. Esta formación es parte de las secuencias sedimentarias y volcánicas del cretácico inferior alto a cretácico superior bajo, compuestas por rocas epiclásticas, piroclásticas y lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres.



**Figura 3.2.** Mapa geológico de la cuenca del río Claro de Rengo (Fuente: SERNAGEOMIN, 2003).

### 3.4 Aguas Subterráneas

### 3.4.1 Formaciones acuíferas

El relleno del valle central está formado por materiales fluviales del tipo arena, ripio y balones en los estratos más superficiales, y materiales aluviales del tipo conglomerados arcillosos, ripio, arena gruesa, media, fina y poca arcilla en los estratos inferiores. El espesor total de los rellenos se desconoce, pero se estima que debe ser superior a los 50 m. El acuífero en general es freático, presentando en algunos sectores algunos grados de confinamiento. Hacia el poniente la situación es la misma variando presumiblemente sólo el espesor del relleno el que, de acuerdo a los sondeos de la zona, podría ser inferior a los 50 m (DGA, 1986).

### **3.4.2 Profundidad del nivel estático**

En el valle del río Claro las mayores profundidades se presentan en la parte alta, con valores medios del orden de los 25 m, disminuyendo hacia el poniente hasta 5 m en la ciudad de Rengo y del orden de 3 m en la desembocadura al río Cachapoal. Las mayores fluctuaciones se producen al oriente de Rengo, con ascensos en invierno, las que se van atenuando hacia el poniente para ser prácticamente nulas cerca de la confluencia con el Cachapoal (DGA, 1986).

### **3.4.3 Propiedades Hidráulicas**

En el valle del río Claro en general las transmisibilidades están comprendidas entre los 1.000 y 5.000 m<sup>2</sup>/día. Los menores valores se encuentran en torno a Rengo, alcanzando entre 500 y 1.000 m<sup>2</sup>/día y menos de 500 m<sup>2</sup>/día en la franja oriental del valle. Los mayores valores, entre 5.000 y 10.000 m<sup>2</sup>/día, se encuentran en la parte central del valle, entre Requínoa y Rosario, prolongándose hasta Quinta de Tilco, donde se alcanzan incluso transmisibilidades superiores a 10.000 m<sup>2</sup>/día. Las productividades aumentan también hacia el poniente, siendo en general superiores a los 10 m<sup>3</sup>/h/m. Hacia el norte, en la localidad de Rosario, se tienen productividades superiores a 200 m<sup>3</sup>/h/m en ciertos puntos (DGA, 1986).

## **3.5 Recursos Hídricos y Riego**

La hoya hidrográfica del río Claro de Rengo es relativamente pequeña y no penetra profundamente en el macizo andino (solo 95 km<sup>2</sup> de la cuenca se ubican sobre los 2.200 msnm), por lo que la acumulación de nieve en invierno no es suficiente para asegurar un elevado caudal en períodos de estiaje. Existen varios esteros afluentes y cauces recolectores de derrames y afloramientos del acuífero que aportan al río Claro de Rengo en su ribera norte, provenientes de las áreas servidas por el río Cachapoal (DGA, 1984).

En la cabecera del río Claro de Rengo se ubica el embalse Los Cristales, cuya capacidad es de 8,5 millones de m<sup>3</sup> y se puede llenar hasta dos veces en un año normal (CNR, 2006; 2008). Este embalse regula en cierto grado el río Claro, aunque representa una pequeña fracción del caudal necesario (CNR, 2006; 2008).

Las áreas de cultivo al interior de la cuenca son regadas por aguas provenientes de la primera y segunda sección del río Cachapoal, así como, de la primera y segunda sección del río Claro de Rengo. Cabe señalar, que la segunda sección del río Cachapoal riega solo una pequeña proporción de la cuenca.

A continuación se presentan los antecedentes recogidos sobre los sectores de aprovechamiento de derechos de agua en ambos ríos.

### **3.5.1 Río Claro de Rengo**

La 1ª Sección del río Claro de Rengo comprende desde el embalse Los Cristales hasta el puente La Chimba y abarca un área de 475 km<sup>2</sup> (DGA, 1996). Se abastece preferentemente de los deshielos primaverales, por lo que el mayor caudal se produce entre noviembre y diciembre, disminuyendo fuertemente en los meses posteriores (CNR, 2008). La 1ª Sección se encuentra controlada por una Junta de Vigilancia constituida en 1952 y su jurisdicción incluye desde el embalse Los Cristales hasta el puente La Chimba, sector donde puede agotar el cauce (DGA, 1984).

Los derechos de agua sobre el río Claro, 1ª Sección, están divididos en 5.975 acciones que se distribuyen entre 26 canales (DGA, 1984).

La 2ª Sección del río Claro de Rengo incluye el tramo entre el puente La Chimba y la confluencia con el río Cachapoal y abarca un área de 506 km<sup>2</sup> (DGA, 1984; 1996). Sus fuentes de abastecimiento son los excedentes del río y del riego de la 1ª Sección, así como los afloramientos del acuífero y el excedente del riego que se realiza con aguas del río Cachapoal, en la ribera norte del río Claro de Rengo (DGA, 1984; 1996). Solo los primeros canales originados en la 2ª Sección suelen sufrir déficit de aguas en períodos de estiaje, mientras que los restantes cuentan con gran abundancia de este recurso, lo cual no ha incentivado la organización legal de los usuarios. En el **Anexo 1** se presenta un resumen de los canales, usuarios y hectáreas regadas en la 1ª Sección y 2ª Sección, mientras que en el **Anexo 2** se presenta su diagrama unifilar.

### **3.5.2 Río Cachapoal**

El río Cachapoal drena una superficie de 6.730 km<sup>2</sup> y sus nacientes están en los faldeos de los cerros Pico del Barroso (5.160 msnm) y los Piuquenes (4.460 msnm). Desde su nacimiento y hasta su confluencia con el Tinguiririca, el Cachapoal escurre en un tramo de 170 km (DGA, 1996).

Al entrar al valle central, el río Cachapoal escurre con dirección NW donde se le une, por la ribera izquierda, el estero Cauquenes. En plena depresión intermedia describe un arco hacia el norte. Desde Rancagua y hasta Peumo el río vuelve al SW, acercándose al pie oriental de la Cordillera de la Costa (DGA, 1996).

Aguas abajo de la afluencia del río Claro de Rengo, que proviene del oriente, el Cachapoal cambia sensiblemente su curso, dirigiéndose al NNW, hasta la Junta. En este tramo recibe la afluencia de varios esteros menores y el estero Antivero o Zamorano quienes, junto con el Claro, drenan el Valle Central en esta zona (DGA, 1996).

El río Cachapoal está dividido en tres secciones que permiten organizar los derechos de agua.

- i. La 1ª Sección, comprende desde el nacimiento del río hasta la Punta de Cortés, aguas arriba de la confluencia del estero la Cadena con el río Cachapoal (DGA, 1996). Abarca un área de 2.981 km<sup>2</sup>.
- ii. La jurisdicción de la 2ª Sección, incluye el tramo comprendido entre la Punta de Cortés y la confluencia del estero Purén o Idahue con el río Cachapoal (DGA, 1996). Abarca un área de 1.188 km<sup>2</sup>.
- iii. La 3ª Sección, abarca desde la confluencia del estero Purén o Idahue (pertenece a la Segunda Sección), hasta la confluencia con el río Tinguiririca (DGA, 1996). Abarca un área de 281 km<sup>2</sup>.

Como se señaló anteriormente, el área de estudio es regada por aguas provenientes de la 1ª y 2ª sección del río Cachapoal, en particular, por lo canales de la ribera sur.

En el **Anexo 1** se presenta un resumen de las áreas de riego por canal de la ribera sur de la 1ª y 2ª Sección, así como, el método de cálculo de la dotación estimada por DGA (1996) y las acciones por canal de riego. En el **Anexo 2** se presenta el diagrama unifilar de la ribera sur del río Cachapoal, que contiene las tres secciones, delimitadas según se indica a continuación.

### **3.5.3 Oferta y demanda hídrica en la zona de estudio**

La estimación de la oferta de recursos hídricos disponibles en la zona de estudio fue realizada por DGA (1996) mediante el uso de estaciones en régimen natural, empleadas como base, a partir de las cuales se realizó una transposición de los caudales medios anuales, por unidad de área y de precipitación. La distribución mensual se efectuó a partir de coeficientes medios calculados en la estación base respectiva, según el tipo de año y de cuenca. La estación base o de referencia para la transposición se escogió considerando que su régimen de escurrimiento fuese representativo de la subcuenca en análisis, la altura probable de la línea de nieves, la ubicación, tamaño y geomorfología (DGA, 1996).

El **Cuadro 3.1** y **Cuadro 3.2** muestran los caudales disponibles en la 1ª y 2ª sección del río Cachapoal, según su probabilidad de excedencia.

El **Cuadro 3.3** y **Cuadro 3.4** muestran los caudales disponibles en la 1ª y 2ª sección del río Claro de Rengo, según su probabilidad de excedencia.

**Cuadro 3.1.** Caudales disponibles en la 1ª sección del río Cachapoal (Fuente: DGA, 1996).

| P. exc. (%) | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT    | NOV    | DIC    | ENE    | FEB    | MAR    | ABR   | ANUAL  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 5%          | 70,36 | 69,83 | 81,86 | 97,31 | 88,61 | 93,03 | 122,01 | 182,15 | 303,45 | 303,12 | 208,58 | 131,72 | 70,36 | 145,21 |
| 10%         | 64,49 | 65,72 | 75,62 | 90,16 | 81,92 | 85,78 | 112,36 | 167,47 | 278,21 | 277,59 | 190,95 | 120,52 | 64,49 | 133,42 |
| 20%         | 62,62 | 63,02 | 68,31 | 75,36 | 71,84 | 74,58 | 104,70 | 154,80 | 237,35 | 238,46 | 164,82 | 103,94 | 62,62 | 114,29 |
| 50%         | 52,76 | 56,10 | 56,04 | 50,07 | 50,55 | 60,02 | 89,48  | 145,57 | 185,08 | 174,46 | 120,19 | 80,78  | 52,76 | 94,36  |
| 60%         | 49,06 | 49,55 | 53,17 | 42,80 | 45,29 | 52,16 | 81,22  | 133,92 | 169,59 | 152,35 | 107,40 | 75,92  | 49,06 | 85,06  |
| 70%         | 46,32 | 37,30 | 50,30 | 38,43 | 42,20 | 44,56 | 78,41  | 129,79 | 163,02 | 139,88 | 103,05 | 71,51  | 46,32 | 78,70  |
| 80%         | 45,06 | 36,05 | 43,22 | 37,50 | 40,90 | 43,11 | 75,18  | 126,97 | 156,96 | 132,41 | 97,55  | 68,37  | 45,06 | 74,94  |
| 85%         | 44,28 | 34,89 | 42,28 | 33,60 | 40,55 | 42,24 | 74,25  | 124,88 | 140,95 | 125,43 | 94,12  | 65,68  | 44,28 | 74,13  |
| 90%         | 43,79 | 34,50 | 34,22 | 30,54 | 39,87 | 41,74 | 73,45  | 123,06 | 135,21 | 121,20 | 90,68  | 65,12  | 43,79 | 70,78  |
| 95%         | 40,14 | 32,12 | 30,27 | 26,61 | 35,10 | 38,26 | 64,03  | 108,29 | 119,45 | 108,58 | 82,85  | 64,58  | 40,14 | 62,52  |

**Cuadro 3.2.** Caudales disponibles en la 2ª sección del río Cachapoal (Fuente: DGA, 1996).

| P. exc. (%) | ABR   | MAY   | JUN    | JUL    | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | ANUAL |
|-------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5%          | 31,26 | 62,58 | 140,26 | 115,32 | 87,92 | 66,16 | 59,21 | 71,11 | 64,17 | 56,42 | 41,98 | 34,85 | 31,26 | 68,89 |
| 10%         | 25,91 | 51,96 | 111,68 | 105,52 | 71,90 | 53,26 | 51,15 | 69,81 | 58,34 | 47,69 | 34,82 | 27,99 | 25,91 | 56,35 |
| 20%         | 23,05 | 47,59 | 99,51  | 94,61  | 64,01 | 47,39 | 48,09 | 62,42 | 54,30 | 42,70 | 30,95 | 24,91 | 23,05 | 50,14 |
| 50%         | 19,40 | 28,26 | 37,68  | 58,00  | 33,79 | 34,10 | 43,61 | 45,12 | 38,63 | 29,53 | 22,79 | 19,28 | 19,40 | 35,41 |
| 60%         | 18,79 | 26,05 | 33,31  | 52,41  | 31,36 | 30,99 | 42,36 | 43,23 | 37,43 | 27,35 | 21,45 | 18,24 | 18,79 | 32,59 |
| 70%         | 17,51 | 20,99 | 30,99  | 40,66  | 28,11 | 25,21 | 32,75 | 41,02 | 36,06 | 25,51 | 20,29 | 17,54 | 17,51 | 30,30 |
| 80%         | 16,76 | 19,44 | 29,67  | 39,08  | 27,00 | 23,88 | 30,60 | 37,67 | 35,40 | 24,13 | 19,21 | 16,71 | 16,76 | 28,07 |
| 85%         | 16,69 | 18,10 | 29,24  | 38,55  | 26,64 | 20,16 | 24,25 | 32,02 | 33,73 | 20,28 | 15,44 | 13,78 | 16,69 | 25,38 |
| 90%         | 16,60 | 16,60 | 28,88  | 36,06  | 25,60 | 18,13 | 22,82 | 31,05 | 32,09 | 18,99 | 13,98 | 13,07 | 16,60 | 23,74 |
| 95%         | 16,07 | 15,46 | 28,58  | 34,38  | 23,93 | 17,29 | 20,84 | 27,53 | 28,98 | 17,46 | 13,29 | 11,82 | 16,07 | 21,74 |

**Cuadro 3.3.** Caudales disponibles en la 1ª sección del río Claro de Rengo (Fuente: DGA, 1996).

| P. exc. (%) | ABR  | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   | ENE   | FEB   | MAR   | ABR  | ANUAL |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 5%          | 9,82 | 12,85 | 19,59 | 26,56 | 21,20 | 18,31 | 21,50 | 27,70 | 32,59 | 27,20 | 17,67 | 10,05 | 9,82 | 20,42 |
| 10%         | 9,26 | 12,11 | 18,47 | 25,05 | 19,99 | 17,26 | 20,27 | 26,12 | 30,73 | 25,64 | 16,66 | 9,48  | 9,26 | 19,25 |
| 20%         | 8,37 | 11,16 | 16,70 | 22,64 | 18,07 | 15,60 | 18,72 | 24,59 | 27,78 | 23,18 | 15,06 | 8,73  | 8,37 | 17,41 |
| 50%         | 4,50 | 7,18  | 10,12 | 10,70 | 9,95  | 11,80 | 14,65 | 21,16 | 19,68 | 14,97 | 9,89  | 6,82  | 4,50 | 12,06 |
| 60%         | 4,26 | 6,91  | 9,15  | 9,63  | 8,96  | 10,62 | 13,93 | 20,50 | 18,97 | 13,48 | 9,41  | 6,56  | 4,26 | 10,86 |
| 70%         | 4,14 | 4,04  | 8,59  | 9,20  | 8,66  | 8,01  | 13,49 | 19,57 | 18,50 | 12,77 | 8,42  | 6,39  | 4,14 | 10,07 |
| 80%         | 3,98 | 3,92  | 8,34  | 8,94  | 8,27  | 7,88  | 13,17 | 19,05 | 18,26 | 12,06 | 8,30  | 6,19  | 3,98 | 9,77  |
| 85%         | 3,92 | 3,67  | 4,40  | 5,67  | 8,19  | 7,51  | 13,04 | 18,26 | 17,91 | 11,94 | 7,91  | 6,02  | 3,92 | 9,50  |
| 90%         | 3,88 | 3,28  | 3,94  | 5,07  | 7,61  | 7,43  | 12,06 | 16,33 | 16,18 | 11,54 | 7,83  | 5,44  | 3,88 | 8,49  |
| 95%         | 3,57 | 2,91  | 3,49  | 4,49  | 6,74  | 7,09  | 10,68 | 14,46 | 14,33 | 10,21 | 7,45  | 4,82  | 3,57 | 7,52  |

**Cuadro 3.4.** Caudales disponibles en la 2<sup>da</sup> sección del río Claro de Rengo (Fuente: DGA, 1996).

| P. exc.(%) | ABR   | MAY   | JUN   | JUL   | AGO   | SEP   | OCT   | NOV   | DIC   | ENE   | FEB   | MAR   | ABR   | ANUAL |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5%         | 14,19 | 29,87 | 68,40 | 54,77 | 41,30 | 29,76 | 25,36 | 29,85 | 26,29 | 23,22 | 17,65 | 15,51 | 14,19 | 31,16 |
| 10%        | 10,77 | 23,41 | 51,90 | 49,75 | 31,34 | 22,59 | 21,28 | 27,95 | 23,24 | 17,62 | 13,40 | 11,77 | 10,77 | 23,65 |
| 20%        | 9,65  | 21,32 | 46,30 | 43,76 | 27,96 | 20,15 | 19,95 | 25,85 | 20,44 | 16,19 | 11,95 | 10,50 | 9,65  | 21,09 |
| 50%        | 8,53  | 12,90 | 17,02 | 26,65 | 14,57 | 14,25 | 18,10 | 17,62 | 15,20 | 11,12 | 9,01  | 8,10  | 8,53  | 14,85 |
| 60%        | 8,07  | 12,29 | 14,14 | 25,14 | 13,75 | 13,45 | 17,17 | 17,05 | 14,11 | 10,52 | 8,54  | 7,66  | 8,07  | 14,01 |
| 70%        | 7,58  | 8,91  | 13,48 | 19,12 | 12,29 | 10,49 | 12,83 | 15,35 | 13,67 | 9,48  | 7,97  | 7,30  | 7,58  | 12,46 |
| 80%        | 7,38  | 8,34  | 12,74 | 17,56 | 11,63 | 10,00 | 12,10 | 14,48 | 13,41 | 9,03  | 7,59  | 6,96  | 7,38  | 11,87 |
| 85%        | 7,26  | 8,18  | 12,57 | 17,32 | 11,48 | 8,23  | 9,30  | 12,18 | 13,08 | 7,42  | 5,74  | 5,64  | 7,26  | 10,76 |
| 90%        | 6,98  | 7,43  | 12,24 | 17,00 | 10,92 | 7,32  | 8,26  | 10,83 | 11,63 | 6,59  | 5,10  | 5,01  | 6,98  | 9,56  |
| 95%        | 6,84  | 7,11  | 12,04 | 16,31 | 10,46 | 7,00  | 7,91  | 10,36 | 11,13 | 6,31  | 4,88  | 4,79  | 6,84  | 9,15  |

Por su parte, la demanda hídrica estimada por DGA (1996) se hizo mediante dos métodos, de acuerdo a la información disponible.

- Demanda agrícola de la cuenca, el cual consiste en definir una demanda a partir de cálculos teóricos de la tasa de riego.
- Capacidad máxima de los canales, que permite definir la demanda sobre la base de la máxima cantidad de agua posible derivar de la fuente.

Las limitaciones de estos métodos, de acuerdo a DGA (1996) son las siguientes:

- El criterio de las demandas agrícolas de riego es semiteórico y normalmente requiere de la adopción de una serie de supuestos, discutibles y no siempre son muy claros. Debe considerarse también el actual desarrollo de las tecnologías de riego y su adopción por parte de los regantes, en el sentido que lo histórico nada o poco tiene que ver con la situación actual, y menos con la futura.
- El criterio de la capacidad máxima de los canales no siempre es representativo de la demanda real por ser, a veces, superior al uso histórico del agua. Aunque tiene la ventaja que corresponde a la máxima cantidad de agua que puede ser derivada de la fuente.

El **Cuadro 3.5** presenta la demanda agrícola de riego, de acuerdo a la metodología descrita por DGA (1996). Cabe señalar que estos resultados corresponden a las riberas norte y sur del río Cachapoal.

**Cuadro 3.5.** Demanda mensual de riego por sección de río (Fuente: DGA, 1996).

| Sección               | Sup (ha) | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Ene   | Feb   | Mar   |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 <sup>a</sup> Cach   | 50.131   | 39,24 | 25,41 | 15,44 | 22,19 | 21,23 | 47,28 | 47,28 | 60,47 | 76,87 | 92,63 | 85,87 | 68,51 |
| 2 <sup>da</sup> Cach  | 14.935   | 11,69 | 7,57  | 4,60  | 6,61  | 6,32  | 14,09 | 14,09 | 18,01 | 22,90 | 27,60 | 25,58 | 20,41 |
| 1 <sup>a</sup> Claro  | 6.940    | 5,43  | 3,52  | 2,14  | 3,07  | 2,94  | 6,54  | 6,54  | 8,37  | 10,64 | 12,82 | 11,89 | 9,48  |
| 2 <sup>da</sup> Claro | 5.985    | 4,68  | 3,03  | 1,84  | 2,65  | 2,53  | 5,64  | 5,64  | 7,22  | 9,18  | 11,06 | 10,25 | 8,18  |

Los resultados de la estimación de la capacidad máxima de los canales se presentan a continuación, como el total por sección. El detalle por canal se encuentra en DGA (1996), mientras que estos resultados consideran a las riberas norte y sur del río Cachapoal.

- Río Cachapoal, 1ª Sección: 134,29 m<sup>3</sup>/s
- Río Cachapoal, 2ª Sección: 130,31 m<sup>3</sup>/s
- Río Claro, 1ª Sección: 25,65 m<sup>3</sup>/s
- Río Claro, 2ª Sección: 44,16 m<sup>3</sup>/s

El cruce de la oferta y demanda permitió a DGA (1996) obtener los siguientes diagnósticos de las cuencas, considerando solo la demanda de riego mensual presentada en la **Cuadro 3.5**:

1. Río Cachapoal

- **Primera Sección:** Hay déficit de 20 hm<sup>3</sup>, o sea, 7% de la demanda, en los meses de marzo y septiembre. Sin embargo, hay sobrante en el resto del año.
- **Segunda Sección:** Hay déficit de 62 hm<sup>3</sup>, 33% de la demanda, los meses críticos de enero, febrero y marzo. En otros meses hay sobrante.

2. Río Claro de Rengo

- **Primera Sección:** Se producen déficits de 35 hm<sup>3</sup>, 34% de la demanda, en los meses críticos de enero, febrero, marzo y abril. Hay sobrante en el resto del año.
- **Segunda Sección:** Hay déficits de 35 hm<sup>3</sup>, 46% de la demanda, en los meses de enero, febrero y marzo. En el resto del año hay sobrante.

Cabe señalar que existe un estudio más reciente de oferta y demanda hídrica realizado por DGA (2007) a través de la consultora Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. En este estudio las demandas hídricas se presentan a nivel de la cuenca del río Cachapoal. Mientras que el estudio DGA (1996) permite diferenciar entre cauces y sus distintas secciones de aprovechamiento de los derechos de agua.

### 3.6 Calidad de Aguas

El monitoreo de la calidad de agua realizado por la DGA desde 1980 en la cuenca del río Rapel, indica que los principales impactos ambientales en el Río Claro de Rengo tienen su origen en el uso de agroquímicos y la contaminación difusa por aguas servidas (CNR, 2006). Por otra parte, la Junta de Vigilancia de río realiza desde el año 2001 un monitoreo eventual de parámetros químicos sobre el sistema de riego, donde se observa que el mercurio y el molibdeno presentan tendencias límites sobre la base de la Norma Chilena 1.333 (CNR, 2006). Asimismo, CNR (2006) ha realizado un monitoreo mensual, considerando parámetros microbiológicos a las aguas del Río Claro, tomando en cuenta cuatro puntos dentro del sistema: Sector Limnómetro,

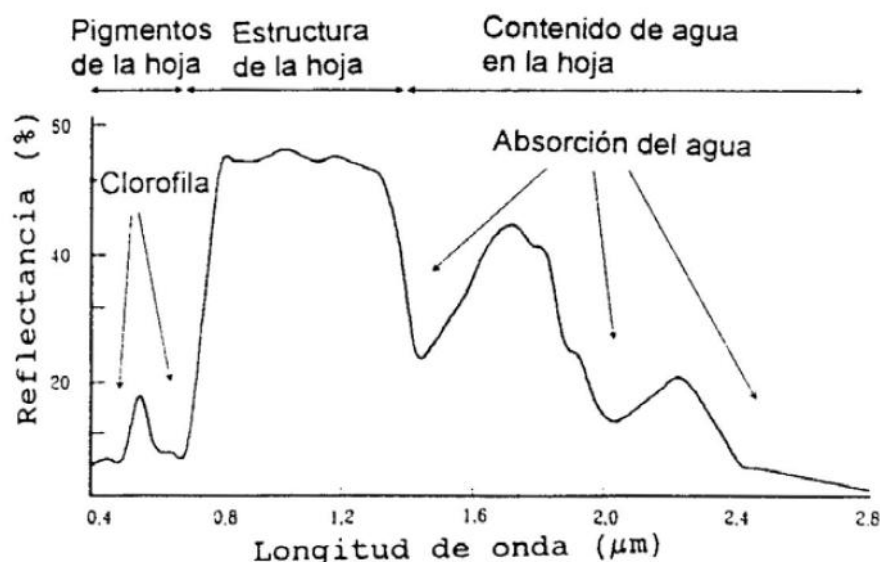
Piedras Coloradas, Puente Popeta y Cuesta Popeta. Los resultados de coliformes fecales indican que en general el agua está por debajo de este límite, por lo que sería apta para uso de riego. Sólo el sector cuesta Popeta, presentó un valor superior a la norma (límite máximo 1.000 NPM/100ml según la Norma Chilena 1.333) en febrero (1.600 NPM/100ml), lo que se atribuye a la presencia de balnearios en la zona (CNR, 2006).

### 3.7 Reflectancia de cultivos

Todo objeto en la naturaleza posee una distribución única de radiación reflejada, transmitida y absorbida. Estas características espectrales pueden ser usadas para distinguir un objeto de otro o para obtener información acerca de la forma, tamaño y otras propiedades físicas y químicas (Soria *et al.*, 1998). Las propiedades particulares de cada material producen una distribución específica de la reflectancia en diferentes longitudes de onda, generando un patrón único conocido como firma espectral.

Se menciona en la literatura que el comportamiento espectral típico de la vegetación vigorosa (**Figura 3.3**), muestra una reducida reflectancia en las bandas del visible con un máximo relativo en la porción verde, en torno a 0,55  $\mu\text{m}$ , dando la característica del color verde de las hojas. La absorción de luz por los pigmentos de la hoja, principalmente clorofila, xantófila y caroteno, son los responsables de tan baja reflectancia. La reflectancia de la planta en el infrarrojo cercano se incrementa rápidamente cerca de los 0,8  $\mu\text{m}$  y se mantiene en niveles altos a los 1,3  $\mu\text{m}$  aproximadamente. Esta alta reflectancia se atribuye a que esta región del espectro es muy poco absorbida por los pigmentos. La estructura interna de la lámina foliar al parecer adquiere una gran importancia sobre la reflectancia en estas longitudes de onda.

En las bandas de absorción de agua (1,45 a 2,6  $\mu\text{m}$ ) la reflectancia está relacionada de manera indirecta con el contenido total de agua en la hoja, lo que es función del contenido de humedad y del espesor de la hoja, siendo la estructura interna de la hoja (pigmentos) menos importante.



**Figura 3.3.** Reflectancia teórica de la vegetación.

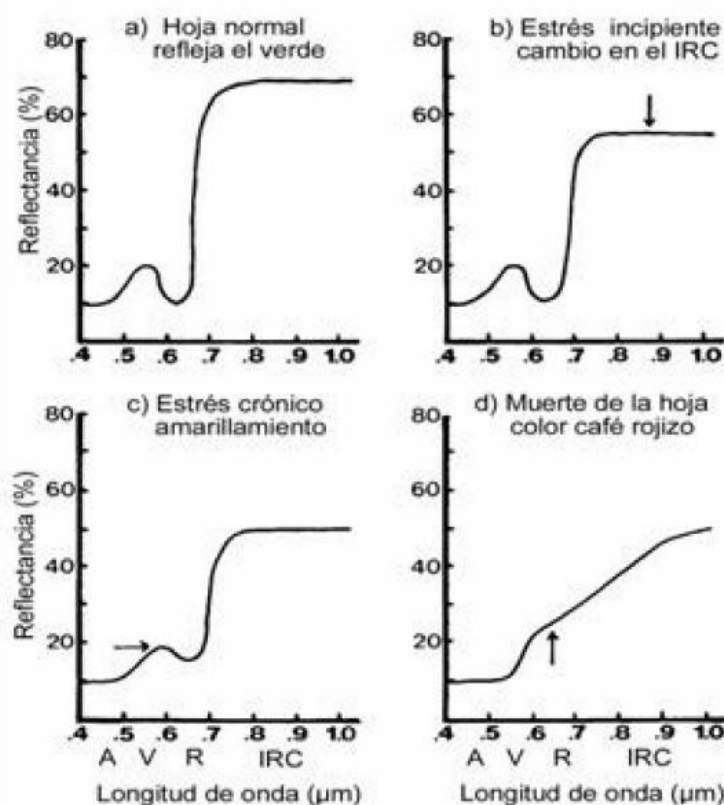
Los factores importantes que influyen en la reflectancia de una cobertura vegetal tienen directa relación con la estructura de la planta, es decir, la conformación de las hojas y tallos que se disponen y agrupan de formas diferentes según la especie. Además, una hoja está constituida por diferentes tipos de pigmentos, una estructura fisiológica compleja relacionada con la especie y las condiciones del sitio donde se desarrollan, como también, posee características fenológicas propias del estado dentro del ciclo biológico en que se encuentra la planta. Por otra parte, la cantidad de energía que es reflejada, absorbida y transmitida en las diferentes longitudes de onda por las hojas, depende de otros factores como la respuesta espectral del suelo, presencia de vegetación senescente, elevación angular del sol y del sensor con el cual se realiza la medición. Por lo anterior, cada especie vegetal presenta una curva espectral única que permite su identificación a través de un análisis espectral. En el **Anexo 3** se presentan los aspectos ecofisiológicos de los principales cultivos.

El comportamiento de la reflectancia de los cultivos bajo condiciones de estrés, comunes en la producción agrícola (déficit/exceso hídrico, desnutrición, enfermedades, plagas, manejo de la canopia, etc.), se ve reflejado en una variación de la firma espectral. Generalmente, en la curva espectral desarrollada para cultivos en condiciones óptimas, se observan ciertos cambios característicos en su firma espectral (**Figura 3.4**).

En la **Figura 3.4** se observa la evolución teórica que tendría un cultivo de ciclo anual bajo niveles crecientes de algún estrés agrícola. Como se mencionó anteriormente, la reflectancia en la hoja en condiciones óptimas (**Figura 3.4a**) se caracteriza por ser baja en el espectro visible y alta en la longitud correspondiente al infrarrojo.

Como se observa en la **Figura 3.4b**, los cambios en la reflectancia espectral debido a algún estrés, primero ocurren en la región del infrarrojo cercano. Gausman (1977) menciona que los constituyentes celulares proporcionan cerca del 8% de la reflectancia en el infrarrojo cercano y que éstos explican el detrimento a esta longitud de onda en una hoja con estrés incipiente. Este cambio en la reflectancia es sutil y no se manifiesta notoriamente en terreno o a simple vista.

Después de la disminución en la intensidad de la reflectancia en el infrarrojo y, si la planta continua por un período bajo estrés agrícola, es probable que se afecten primero los constituyentes internos celulares (membranas, organelos o pigmentos) que la pared celular (estructura más resistente). Es así, que se observa una pérdida o deterioro de los cloroplastos, lo que provoca una disminución en la reflectancia en las bandas correspondientes al espectro visible (**Figura 3.4c**) sobre todo en el verde y rojo (V y R). Este cambio se manifiesta notoriamente en terreno, debido a que en las hojas se observa una coloración amarillenta.



**Figura 3.4.** Firmas espectrales teóricas de un cultivo bajo distintos niveles de estrés (extraído de Jiménez, 2009).

De continuar la condición de estrés en la planta, el deterioro de la estructura interna de la hoja se hace generalizado, lo que se traduce en una reflectancia más baja en todas las longitudes de onda (**Figura 3.4d**), lo que se manifiesta en un enrojecimiento del follaje muerto. La disminución

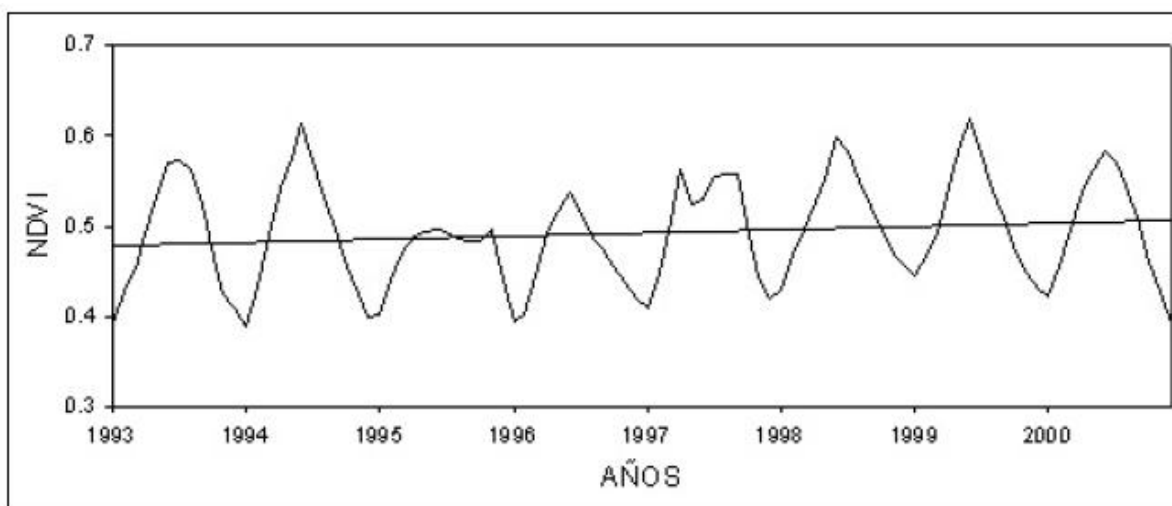
de la reflectancia de las bandas del espectro visible, se debe a la pérdida de pigmentos y el detrimento en la banda en el infrarrojo, se debe a los constituyentes principalmente de la pared celular y espacios de aire. Esta forma de la curva espectral se esperaría también en la época inmediatamente anterior al receso invernal de los frutales de hoja caduca, o bien, al finalizar el ciclo biológico de una planta con hábito anual.

La variación en la intensidad de la curva espectral de un cultivo también ocurre a través del ciclo biológico y productivo de una especie en específico. Esto se debe principalmente a la actividad fotosintética que es propia de cada estado fenológico del cultivo y que tiene un comportamiento temporal similar al observado en la **Figura 3.4**. Además, condiciones de terreno como suelos claros u oscuros, sistemas de conducción restrictivos (conducción en espaldera en la Vid), influyen directamente en la reflectancia obtenida en sensores remotos.

Estudios indican la aplicabilidad de imágenes Landsat para la identificación de cultivos agrícolas. Manjarrez-Domínguez *et al.*, (2007) estudiando las características espectrales de la Alfalfa, Ají, Nogal, Cebolla y Sandía indican que las bandas correspondientes al espectro visible no presentan diferencias considerables entre los cultivos, en cambio, las bandas 5 y 7 (infrarrojo) presentaron rangos de 120 a 180 Números Digitales. Las diferencias atribuibles a estas bandas, pueden ser debidas a la separabilidad espectral en los gradientes de humedad en vegetación y suelo.

El NDVI (*Normalized Vegetation Index*) es un parámetro simple usado principalmente en percepción remota para la identificación y monitoreo de vegetación. Los valores de NDVI de áreas con presencia de vegetación densa tenderán a valores positivos (0,3 – 0,8). Sin embargo, cultivos de baja densidad o cultivados con un espaciamiento entre hileras considerable, ven sus valores de NDVI afectados por la reflectancia correspondiente al suelo.

La estacionalidad de los cultivos agrícolas se ve también reflejada en los índices vegetacionales como el NDVI, en donde se observa que la variación de este parámetro se correlaciona directamente con el estado fenológico del cultivo y su actividad fotosintética (**Figura 3.5**).



**Figura 3.5.** Variación de NDVI desde 1993 hasta 2000 en una zona de pradera (extraído de Serrano *et al.*, 2003).

Como se observa en la **Figura 3.5**, el NDVI para una pradera presenta una oscilación intranual, debida al ciclo estacional de las plantas. Durante el invierno, primeros meses de cada año en el hemisferio norte, el vigor y la actividad fotosintética se reduce considerablemente, debido a las bajas temperaturas y la menor incidencia solar. Lo contrario ocurre en el verano, donde se observan los valores más altos en la temporada.

Al observar el comportamiento temporal del NDVI para una zona agrícola, se puede discriminar la influencia del clima en el vigor de una planta, sobretodo en el caso de praderas naturales en donde un gran porcentaje de su vigor se explica por las lluvias naturales. Como por ejemplo, se observa en la **Figura 3.5**, en la temporada entre 1995 y 1996 se advierte una disminución notoria en el valor de NDVI, lo que se explica por un año de sequía en la zona de estudio. Este mismo fenómeno se esperaría en la zona central de Chile en un año en donde se registren heladas primaverales que disminuyan la producción agrícola.

### 3.8 Necesidades hídricas de los cultivos

El riego, como componente fundamental de la producción agrícola, es uno de los factores que presenta un mayor descuido y falta de conocimiento por parte del agricultor en Chile. El uso y manejo del agua de riego a nivel predial es un aspecto agrícola deficitario tanto en la oportunidad, cantidad como en la calidad del riego. Lo anterior, contrasta con la importancia que reviste como factor en la producción agrícola.

La demanda hídrica se define como la cantidad de agua necesaria para que los cultivos desarrollen su máximo potencial productivo, en función del agua requerida para el correcto desarrollo de sus procesos metabólicos (respiración y fotosíntesis).

La transpiración de las plantas (T), es la pérdida de vapor de agua a través de los estomas (poros ubicados en las hojas de las plantas) hacia la atmósfera. Los estomas deben permanecer abiertos el mayor tiempo posible por la necesidad de mantener un intercambio constante de gases entre la planta y la atmósfera, para así, realizar los procesos metabólicos fundamentales en las plantas como lo son la respiración y la fotosíntesis. Por lo anterior, que las plantas tienen que transpirar vapor de agua durante su ciclo biológico, demanda que debe ser suplida a través de aportes hídricos naturales (precipitaciones) o el riego. La mayor parte del agua absorbida por las raíces desde el suelo, se pierde por transpiración y solamente una pequeña fracción se convierte parte de los tejidos vegetales.

La cantidad de agua que pierde una planta por transpiración varía mucho, ya que depende de la especie, el tamaño, estado fenológico, agua disponible en el suelo y de las condiciones climáticas. Las plantas transpiran vapor de agua dependiendo de la morfología de sus hojas. En general, una planta de hoja ancha y fina (por ejemplo: Lechuga), transpira más agua que una hoja estrecha y gruesa. Los factores climáticos que afectan la transpiración de la planta son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento.

La evaporación (E) es el proceso por el cual el agua cambia de fase líquida a fase vapor (vaporización) y pasa desde la superficie evaporante (por ejemplo el suelo) a la atmósfera. La evapotranspiración (ET) se define como el agua transpirada por la planta más la evaporada por la superficie del suelo. Estos dos procesos ocurren de forma simultánea y difícilmente pueden distinguirse de forma individual, y están influenciados por los mismos factores. La porción de evaporación y transpiración cambia de acuerdo a las diferentes fases de desarrollo y crecimiento de un cultivo. Así, cuando el cultivo está en las primeras fases de desarrollo y predomina el suelo desnudo, el proceso mayoritario es el de evaporación. Cuando el cultivo se desarrolla, cubre progresivamente el suelo hasta que alcanza la máxima cobertura, por ende, la pérdida de agua se debe principalmente a la transpiración.

Existe un gran número de factores que afectan significativamente la ET: (a) parámetros climáticos que expresan la demanda evaporativa de la atmósfera, (b) parámetros asociados al cultivo, y (c) parámetros de manejo y ambientales, asociados a las propiedades del suelo.

### **3.8.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $ET_0$ )**

La  $ET_0$  es un parámetro que expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año específicas, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores del suelo. Por lo anterior, que este factor permite comparar la demanda hídrica de la atmósfera en distintas regiones o superficies.

La evapotranspiración potencial o del cultivo de referencia de una zona geográfica, es un factor relacionado sólo con variables climáticas y permite estimar la demanda evaporativa hipotética de la atmósfera (bajo condiciones óptimas) de un lugar en específico. Para el cálculo de la  $ET_0$  se utiliza una superficie de referencia, la cual se encuentra sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo de pasto bajo condiciones específicas (altura, albedo, condiciones hídricas, etc.).

Estudios de estimación de  $ET_0$  en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins indican que en la zona de estudio se distinguen tres grandes unidades, relacionadas con el relieve, en las cuales se esperarían diferencias en la  $ET_0$ : (1) Planicies litorales, (2) Zonas de altura, pertenecientes a la Cordillera de los Andes y de la Costa y, (3) Depresión intermedia. Son entre estas unidades en las cuales se espera que se encuentren diferencias entre  $ET_0$ . Es así, que la zona de estudio no debiese tener grandes diferencias entre  $ET_0$ , ya que se encuentra contenida completamente en la unidad Depresión intermedia (Sánchez y Carvacho, 2006).

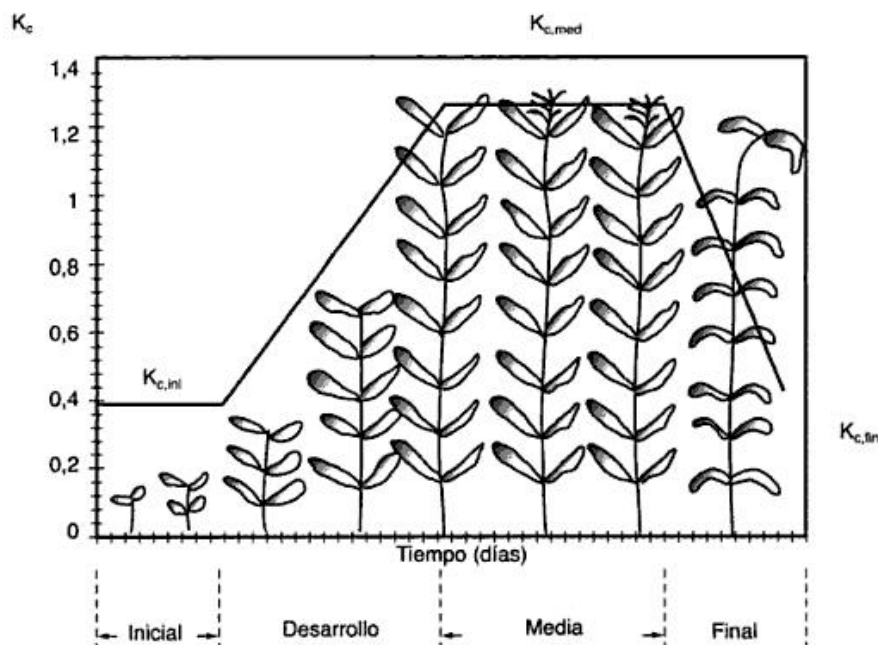
Otra particularidad observada por Sánchez y Carvacho (2006), es la temporalidad de la  $ET_0$  la cual presenta un comportamiento sinusoidal a lo largo del año, presentándose los valores más altos entre diciembre y enero (temporada de mayor demanda por parte de la atmósfera) y los más bajos entre mayo y agosto.

### **3.8.2 Coeficiente de cultivo ( $K_c$ )**

El coeficiente de cultivo se utiliza para ajustar el cultivo de referencia ( $ET_0$ ) con respecto a un cultivo en un estado fenológico específico, es decir, integra los aspectos característicos de una especie vegetal determinantes en la transpiración. Las características diferenciales que integra el concepto de  $K_c$ , entre el cultivo y la superficie de referencia, son:

- i. altura del cultivo,
- ii. albedo de la cubierta,
- iii. morfología de la hoja y,
- iv. área expuesta de suelo desnudo.

La evolución teórica del coeficiente de cultivo a lo largo de un ciclo de crecimiento de un cultivo bajo condiciones óptimas se muestra en la **Figura 3.6**.



**Figura 3.6.** Evolución temporal del coeficiente de cultivo en las diferentes fases del crecimiento.

Dependiendo del estado fenológico de un cultivo, éste adapta sus requerimientos para optimizar los recursos de radiación, agua y nutrientes. Durante las primeras etapas, al ser la cobertura vegetal escasa, la evapotranspiración se debe principalmente a la evaporación del suelo. Es en estas condiciones de poca cobertura que el  $K_{c,ini}$  está determinado principalmente por el contenido de agua que presente el suelo. Cuando el suelo se encuentra humedecido la evaporación del suelo será significativa (valor de  $K_c$  alto), lo contrario ocurre en un suelo seco (valor de  $K_c$  bajo).

A medida que el cultivo aumenta su cobertura de suelo y alcanza su tamaño máximo sombrea cada vez más el suelo, de modo tal que la evaporación se ve cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se convierte en el proceso más importante en la ET ( $K_c$  max).

### 3.8.3 Evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar ( $ET_c$ )

Se define como la evapotranspiración de una cubierta vegetal de un cultivo libre de enfermedades, bajo condiciones óptimas de suministro de agua, con un adecuado aporte de nutrientes, de tal forma que se obtenga la máxima producción bajo las condiciones climáticas dadas por  $ET_0$ . El requerimiento hídrico de un cultivo para un momento dado se puede calcular por la relación:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

La tasa de  $ET_c$  en un predio agrícola está fuertemente influenciada por las prácticas de manejo particulares de cada producción agropecuaria. Estos manejos son los que dicen relación con la alteración de factores climáticos y de cultivo como: la cobertura de la canopia (poda), que afecta directamente en la incidencia de la radiación tanto en el cultivo como hacia el suelo, el método de riego (menor evaporación del suelo con un riego tecnificado), barreras rompe viento, etc.

Por otra parte, todos los cultivos presentan una evolución de sus requerimientos hídricos a lo largo de la temporada de crecimiento. Lo anterior, se debe principalmente a la variación de la demanda evapotranspirativa de la atmósfera y a los cambios propios del cultivo o fenología. En los cultivos con hábito anual (por ejemplo: maíz y frutales de hoja caduca), realizan anualmente un renuevo de toda su área foliar, estado de la planta en que su transpiración se considera muy escasa o nula, además, al coincidir con la época invernal, de bajas temperaturas, el suelo evapora escaso volumen de agua.

#### **3.8.4 Eficiencia del riego**

En forma general, se define como eficiencia en el uso del agua, a la relación entre el volumen de agua utilizado con un fin determinado y el volumen extraído o de una fuente de abastecimiento con ese mismo fin. En el caso particular del agua para el riego de las plantas, la eficiencia de uso para riego (Eff) es la relación entre el volumen utilizado por las plantas en el proceso evapotranspirativo ( $V_u$ ) y el volumen total de agua aplicada para el riego ( $V_t$ ).

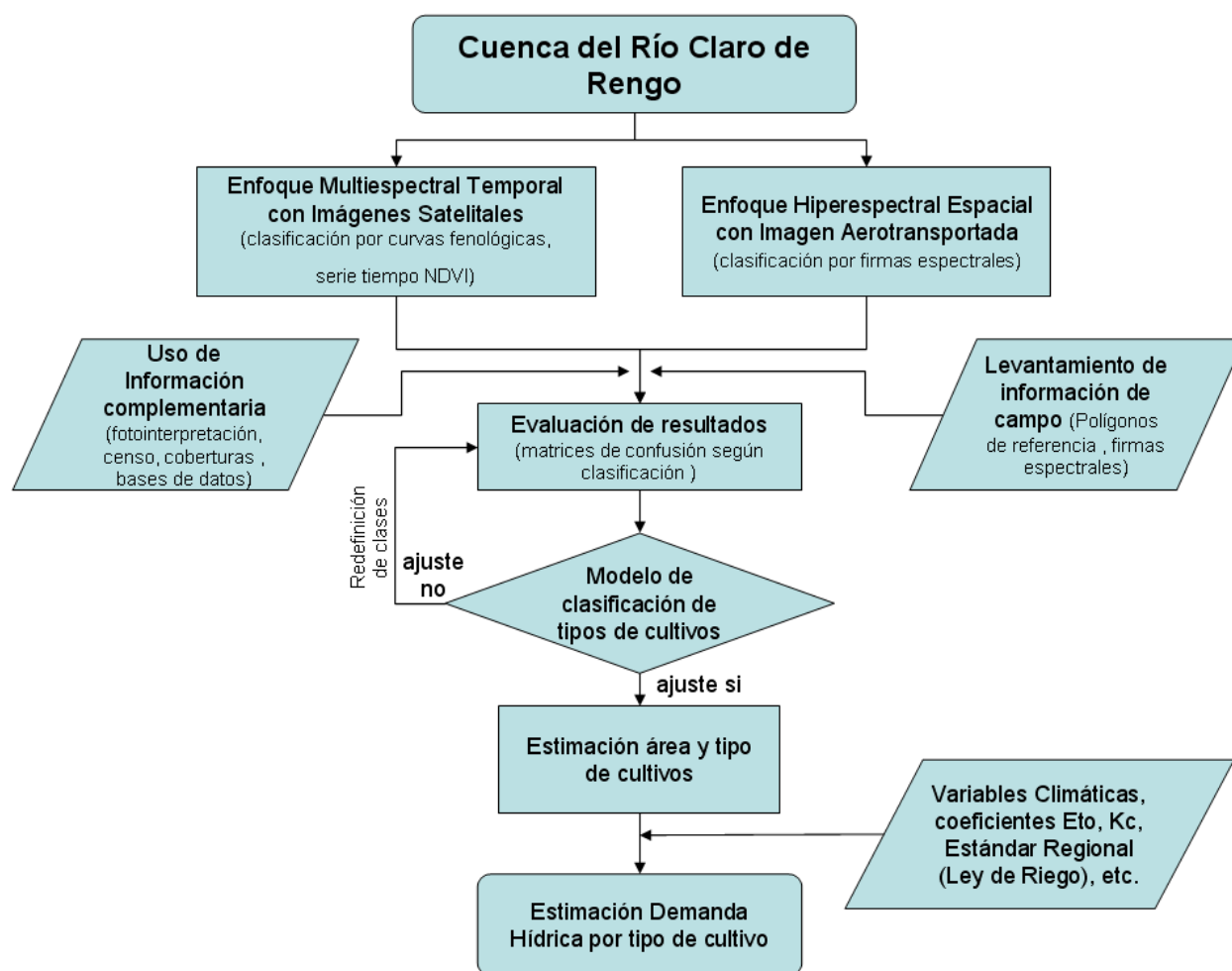
$$Eff = \frac{V_u}{V_t}$$

Los distintos métodos de riego presentan diferentes eficiencias en el uso del agua. Un detalle de esta información se muestra en el **Anexo 4**.

## 4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación en el siguiente diagrama se presenta la metodología de trabajo que se llevó a cabo para abordar el estudio.

En este diagrama se muestra como se desarrollaron y relacionaron las actividades técnicas del trabajo de imágenes multiespectrales, levantamiento de imágenes hiperespectrales, levantamiento de información de campo, el uso de información complementaria, evaluación de los resultados de la clasificación y la estimación de áreas y demandas hídricas por tipo de cultivo.



**Figura 4.1.** Diagrama de la metodología de trabajo.

#### 4.1 Enfoque Multiespectral Temporal con Imágenes Satelitales Landsat

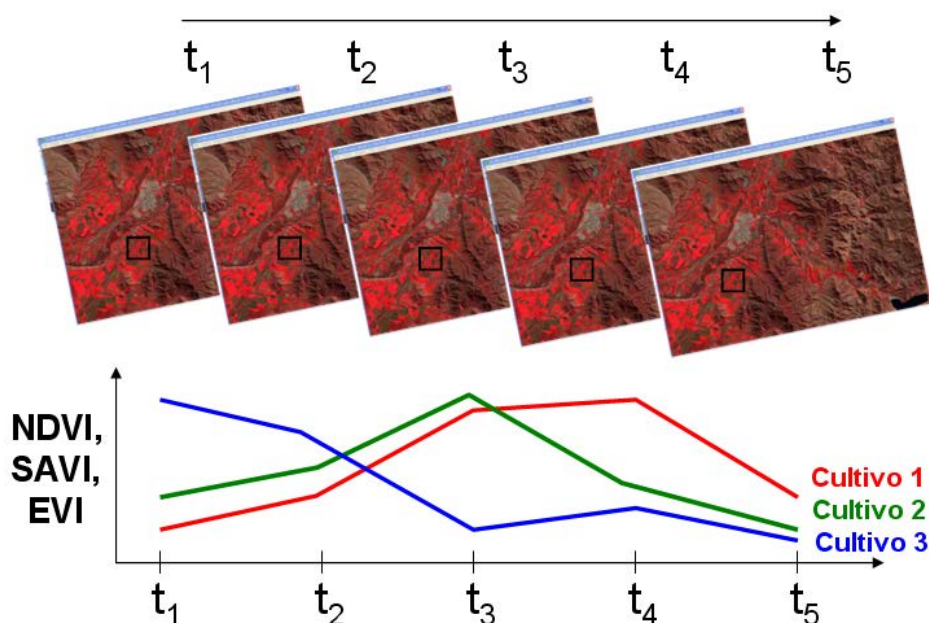
Esta etapa consideró la combinación de una secuencia de imágenes para caracterizar las curvas fenológicas y realizar una clasificación supervisada de los tipos de cultivos.

El pre-proceso de imágenes consistió en la selección de escenas sin nubosidad, que fueron corregidas radiométrica y atmosféricamente. Para luego, efectuar la identificación de las áreas con vegetación, usando un umbral de vigorosidad que permitió la separación del resto de coberturas asociadas a suelo desnudo, cuerpos de agua y zonas urbanas. Las imágenes Landsat permitieron una buena discriminación de coberturas vegetales a una escala de sub-cuenca, resaltando las propiedades reflectivas de las bandas infrarrojas de la vegetación (**Figura 4.2**).



**Figura 4.2.** Imagen LANDSAT TM5 en composición Color Infrarrojo. Sector centro-norte de Chile.

Se utilizó una serie temporal de imágenes Landsat del área de estudio que permitió tener una condición de la vegetación en distintas épocas del año, de modo de registrar las diferencias en las curvas fenológicas y manejo agrícola que puedan tener los distintos predios del sector. Cada pixel de la imagen multiespectral se resumió en una serie temporal de NDVI como identificador de clases de vegetación. La evolución de la intensidad fue utilizada para efectuar una caracterización por tipo de comportamiento fenológico y posteriormente se usó como elemento de clasificación. En la **Figura 4.3** se muestra un esquema de la respuesta esperada de diferentes tipos de cultivos en una serie temporal.



**Figura 4.3.** Esquema de caracterización de firmas temporales de imágenes multispectrales.

En particular para el enfoque multispectral, se recopiló desde la página oficial del servicio geológico de Estados Unidos, una secuencia temporal de imágenes Landsat ETM+ y TM. El período de análisis de la secuencia temporal de imágenes comprendió desde septiembre de 2010 hasta abril-mayo 2011, utilizando un total de 12 imágenes Landsat ETM+ y TM para lograr finalmente 6 composiciones RGB.

Las imágenes fueron las siguientes:

1. Landsat ETM+ 19/09/2010
2. Landsat ETM+ 21/10/2010
3. Landsat ETM+ 06/11/2010
4. Landsat ETM+ 22/11/2010
5. Landsat ETM+ 08/12/2010
6. Landsat ETM+ 24/12/2010
7. Landsat ETM+ 09/01/2011
8. Landsat ETM+ 25/01/2011
9. Landsat ETM+ 26/02/2011
10. Landsat ETM+ 30/03/2011
11. Landsat ETM+ 15/04/2011
12. Landsat ETM+ 01/05/2011

### 13. Landsat TM 17/11/2011 (Rectificación polígonos)

Las composiciones RGB fueron las siguientes:

1. Landsat ETM+ 19/09/2010 – 21/10/2010 (Sept-Oct)
2. Landsat ETM+ 06/11/2010 – 22/11/2010 (Nov)
3. Landsat ETM+ 08/12/2010 – 24/12/2010 (Dic)
4. Landsat ETM+ 09/01/2011 – 25/01/2011 (Ene)
5. Landsat ETM+ 26/02/2011 – 30/03/2011 (Feb- Mar)
6. Landsat ETM+ 15/04/2011 – 01/05/2011 (Abril-Mayo)

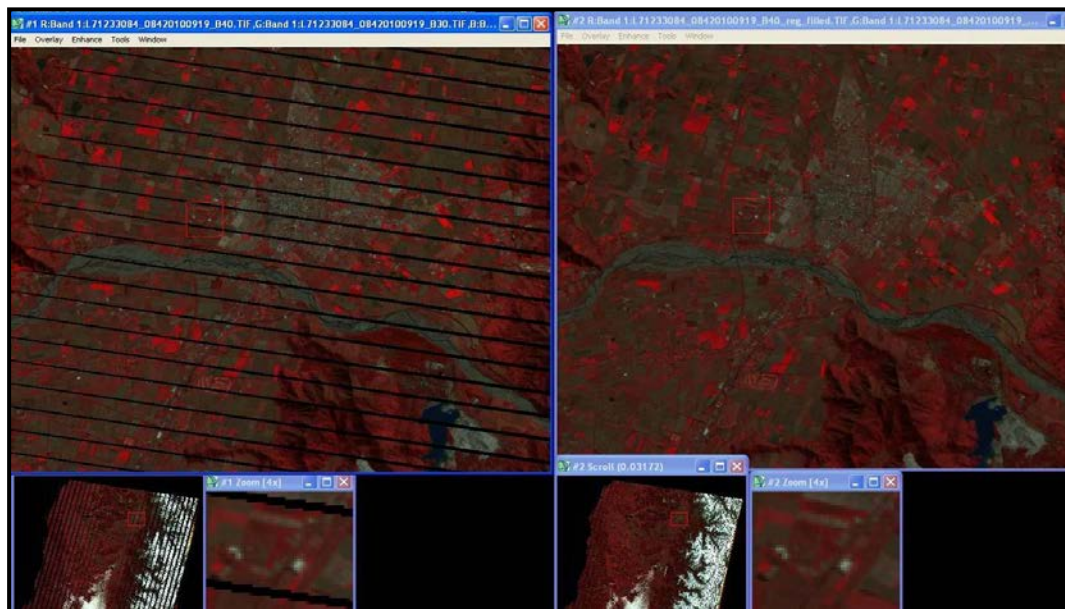
Dentro del procesamiento digital de las imágenes satelitales, se realizaron una serie de correcciones tendientes a mejorar los errores sistemáticos del sensor. En el año 2003 la línea que corrige el escaneo (SLC) del sensor ETM+ (Landsat 7) sufrió problemas técnicos, produciendo vacíos de información conocidos como “*gaps*”. El servicio de aeronáutica y administración del espacio (NASA) administrador del sensor, en conjunto con el servicio de geología de USA (USGS) diseñaron un software de libre acceso que permitió corregir estos errores sistemáticos del sensor (NASA, 2003).

La corrección de las imágenes consistió en obtener dos imágenes de la misma zona en períodos diferentes, que en el caso de la cuenca del río Claro de Rengo, los períodos fueron de 30 días. El método corresponde a una secuencia de pasos que permiten llenar los vacíos en las imágenes Landsat ETM+. El formato de trabajo utilizado fue Geotiff. Dicha corrección permitió obtener una imagen continua y completa en cuanto a niveles digitales (ND) (**Figura 4.4**).

Una vez corregido los *gaps* de las imágenes Landsat ETM+, se realizó la calibración de cada una de las bandas de las imágenes. Las imágenes satelitales entregan valores de los píxeles que indican la cantidad de energía radiante. Estos son valores relativos no calibrados, conocidos como niveles digitales (ND) (Brizuela *et. al.*, 2007). Debido a que los ND son valores relativos, fue necesario realizar su conversión a radiancia con la finalidad de obtener la cantidad de energía electromagnética del área. La conversión a radiancia se realizó con el software ENVI 4.7, con el módulo Landsat calibration, donde se ingresaron los parámetros proporcionados por el header de la imagen que incluye orientación del sol, fecha y hora de la captura, y número de banda.

Por otra parte, debido a que la radiación electromagnética capturada por los sensores debe atravesar la atmósfera, ésta se puede ver modificada por efecto de las partículas presentes en la atmósfera, por lo tanto, el proceso de esparcimiento redirige energía que se añade como radiancia de ruta extraña (extraneous path radiance) a la señal medida por el sensor, mientras que el proceso de absorción atenúa la señal de energía que éste recibe (Lillesand *et. al.*, 2004). Por lo anterior, se aplicaron métodos de corrección atmosféricos que permitieron eliminar los efectos originados por la dispersión de gases y partículas (Riaño *et. al.*, 2000). Para esto, se aplicaron los métodos de corrección QUACK (quick atmospheric correction) y modelo FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes), con el objetivo de evaluar cual

método es el más efectivo para el presente estudio. Finalmente, se optó por el método FLAASH ya que permitió reducir la radiancia añadida a los píxeles de cada banda (Peña, 2007).



**Figura 4.4.** Corrección de “gaps”. Imagen Landsat ETM+, 19 septiembre 2011 y 21 de octubre 2011.

Una vez que se efectuó la corrección atmosférica de cada banda y de toda la secuencia temporal de imágenes Landsat ETM+ y TM, se realizaron los cálculos de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), correspondiente a la medida relativa de vigor de la vegetación contenida en los píxeles de la imagen (Peña, 2007).

La ecuación de NDVI es la siguiente:

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

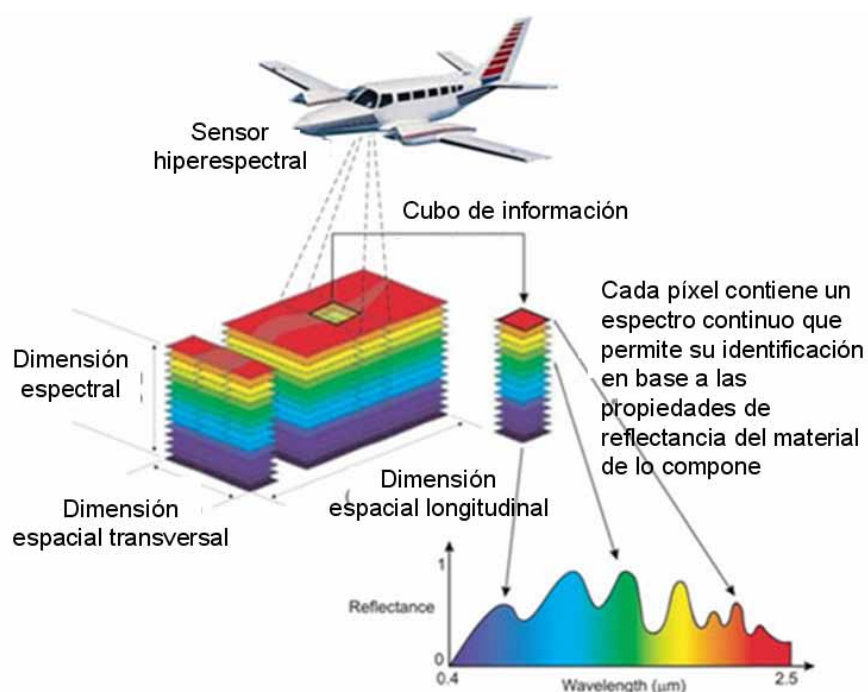
Donde,

NIR: Banda Infrarojo cercano (banda 4 Landsat).

R: Banda del rojo (banda 3 Landsat).

## 4.2 Enfoque Hiperespectral Espacial con Imagen Aerotransportada

Entre las diferentes formas de obtener información teledetectada, está la utilización de sensores hiperespectrales aerotransportados. Este tipo de sensores, al captar información de las características de la superficie terrestre simultáneamente en cientos de bandas espectrales adyacentes, permite obtener información espectral continua del objeto teledetectado (**Figura 4.5**). Con lo anterior, se logra ampliar el rango de información para la interpretación de algún tipo de cobertura en particular, ya sea analizando cada banda de manera individual o generando índices en base a la combinación de éstas. Con ello, es posible realzar la diferencia entre suelo, vegetación, cuerpos de agua u otro elemento del paisaje. Además, la respuesta espectral se puede relacionar con productividad, estacionalidad, fenología, eficiencia de riego o estrés de la vegetación. Así, las imágenes hiperespectrales adquiridas ofrecen la oportunidad de reconocer las firmas espectrales para cada uno de los píxeles de la escena, por lo tanto, se puede caracterizar tipos de cultivo específicos asociados al interés del estudio.



**Figura 4.5.** Esquema de adquisición de información hiperespectral (Fuente: modificado de <http://www.csiro.au>).

De esta forma, el enfoque hiperespectral que se llevó a cabo en este estudio, comprendió la realización de dos vuelos con el sensor hiperespectral para la toma de la imagen y el procesamiento de ésta. Posteriormente, se realizó la clasificación supervisada por firmas espectrales de tipos de cultivos, a través de la caracterización por reflectancia Visible e Infrarroja Cercana.

En forma adicional, existe la posibilidad de reconocer aspectos ecofisiológicos de los principales cultivos, por medio de la aplicación de una metodología de índices vegetacionales avanzados que permiten extraer información específica de la señal de reflectancia de la plantas.

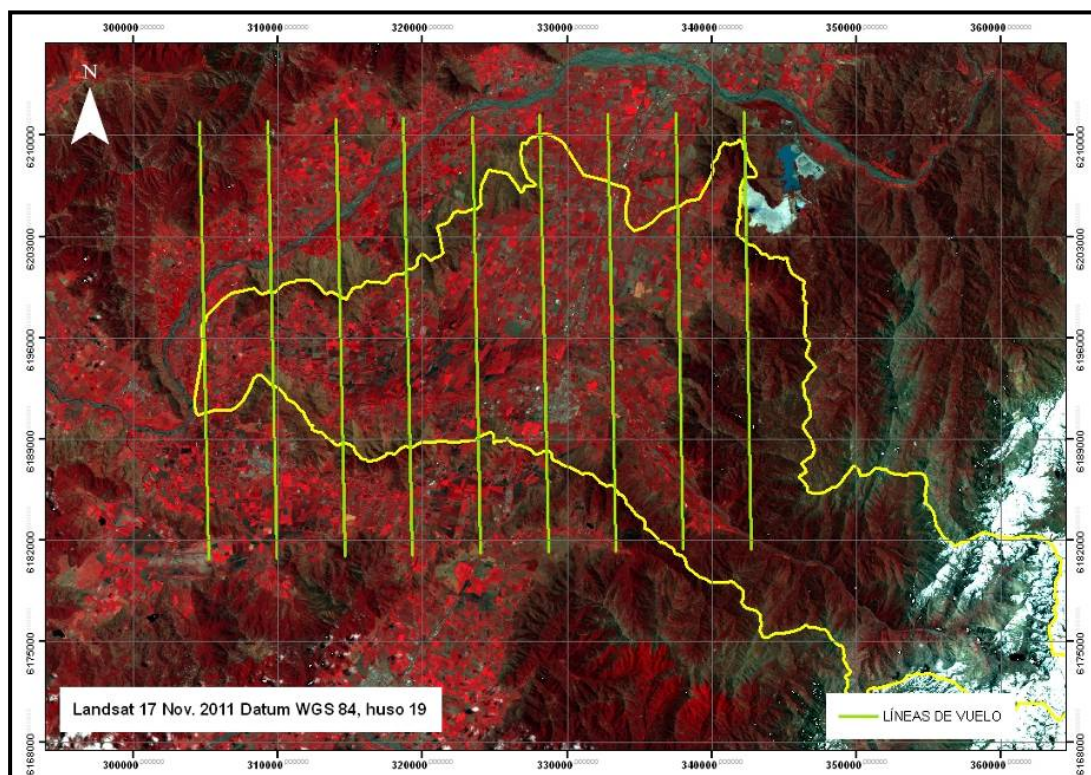
#### **4.2.1 Levantamiento condición escena 1 y 2**

El día 16 de enero 2012 se realizó el primer vuelo para el levantamiento de la condición escena 1 con el sensor hiperespectral. En tanto, el segundo vuelo para el levantamiento de la condición escena 2, se realizó el día 14 de mayo de 2012.

Las características de los vuelos fueron las siguientes:

- Plataforma aérea: Avión Lear Jet del Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile
- Altura de vuelo: 10.400 msnm
- Velocidad de vuelo: 650 km/h
- Sensor utilizado: AISA-Eagle specim
- Rango espectral: 400-900 nm
- Resolución espectral: 2.3-10 nm
- Resolución espacial: 8 m
- N° Bandas: 64-244
- Frecuencia barrido: <60 Hz
- Dimensión barrido espacial: 960 pixeles

En la **Figura 4.6** se muestran las líneas de vuelo con las escenas capturadas.

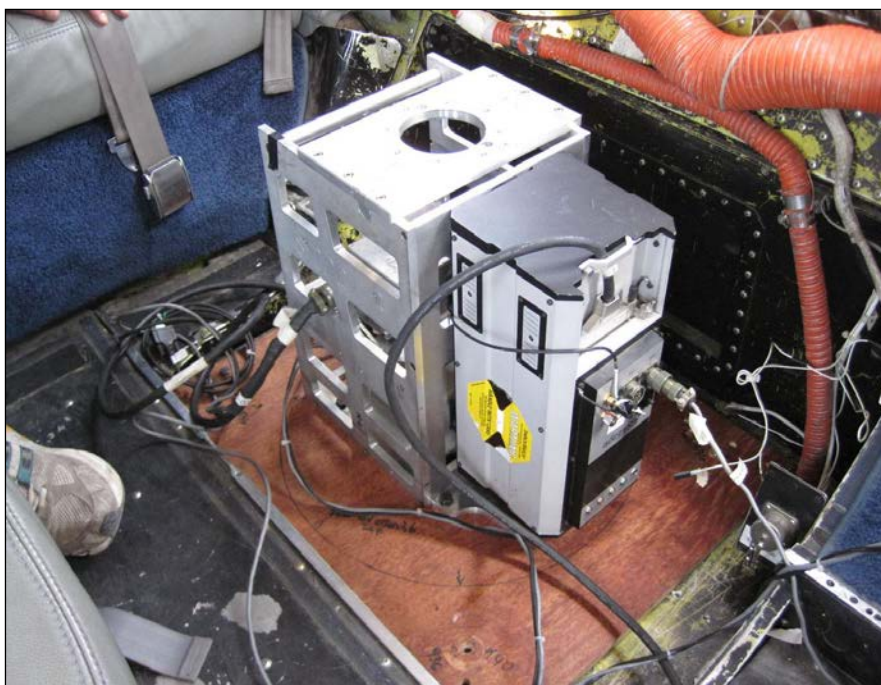


**Figura 4.6.** Líneas de vuelo levantadas con el sensor hiperspectral (imagen base Landsat 17 nov. 2011).

En la **Figura 4.7** se muestra la preparación de la instalación del sensor hiperspectral en el avión Lear Jet y en la **Figura 4.8** el sensor instalado para iniciar el vuelo.



**Figura 4.7.** Instalación del sensor en el avión Lear Jet (SAF).



**Figura 4.8.** Sensor instalado en el Lear Jet.

#### 4.2.2 Corrección de imágenes hiperespectrales

El sistema hiperespectral está compuesto por un GPS omnistar, el cual corrige las coordenadas de manera automática, entregando soluciones como DGPS (GPS Diferencial, por sus siglas en inglés). La unidad de movimiento inercial (IMU) va registrando los ángulos de orientación de la aeronave, los cuales se conocen como heading, roll and pitch (**Figura 4.9**). Estos ángulos se corrigen en cada coordenada y permiten obtener una imagen sin distorsiones. Por lo anterior, la primera corrección realizada a los datos fue la fusión GPS – IMU.



**Figura 4.9.** Registro de movimientos con IMU.

##### 4.2.2.1 Corrección Radiométrica

Una vez que se corrigieron los datos, se realizó la fusión de las imágenes con los datos proporcionados por el GPS. El sensor hiperespectral entrega tres archivos \*.raw, \*.rad, \*.nav, los cuales contienen los valores de cada pixel y la información georreferenciada.

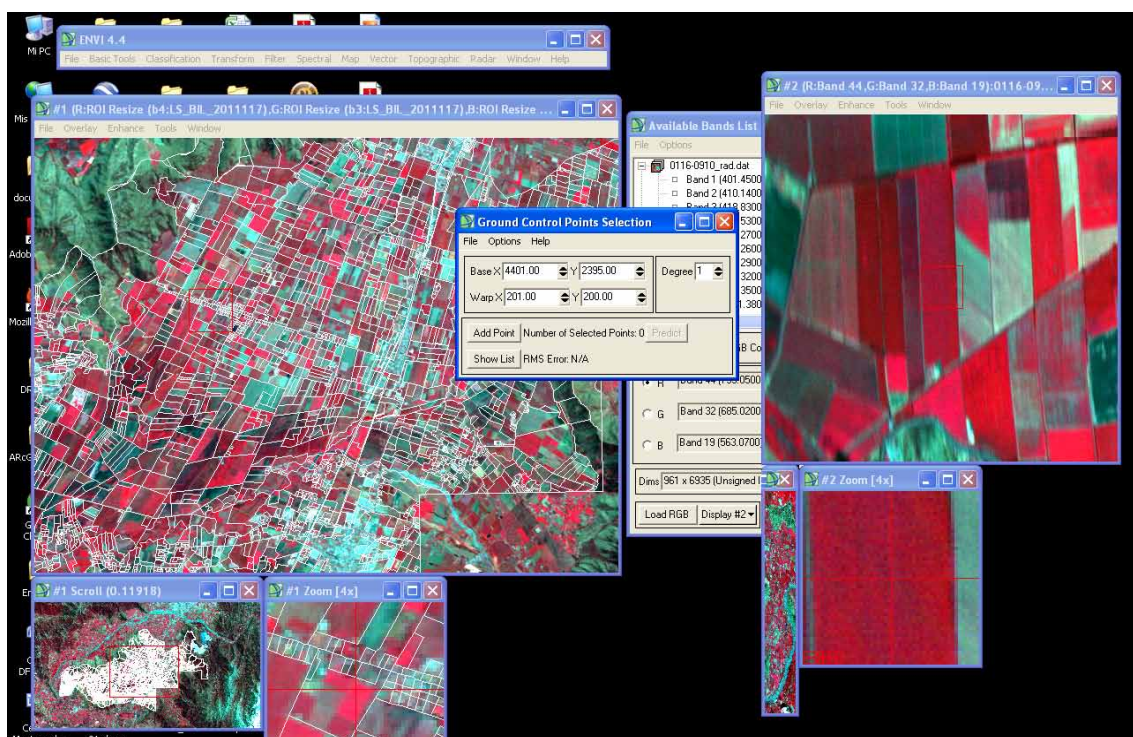
La información de las imágenes viene dada por lo que se conoce como niveles digitales (ND), los que contienen la información de la energía recibida por el sensor en forma de valores relativos no calibrados. Por lo tanto, fue necesario realizar la conversión de niveles digitales a radiancia.

##### 4.2.2.2 Corrección Geométrica

El sistema de proyección de coordenadas UTM y el datum WGS84, Huso 19, fue utilizado en todos los trabajos realizados.

El sistema hiperespectral fue corregido geométricamente para asegurar la precisión, esta corrección se realizó utilizando el Catastro Frutícola (CIREN, 2009).

El procedimiento para la corrección geométrica, consistió en determinar puntos de control y asignarlas en las imágenes hiperespectrales. Se utilizaron aproximadamente 300 puntos de control con la finalidad de georreferenciar de manera precisa el mosaico hiperespectral (**Figura 4.10**).



**Figura 4.10.** Proceso de Corrección Geométrica.

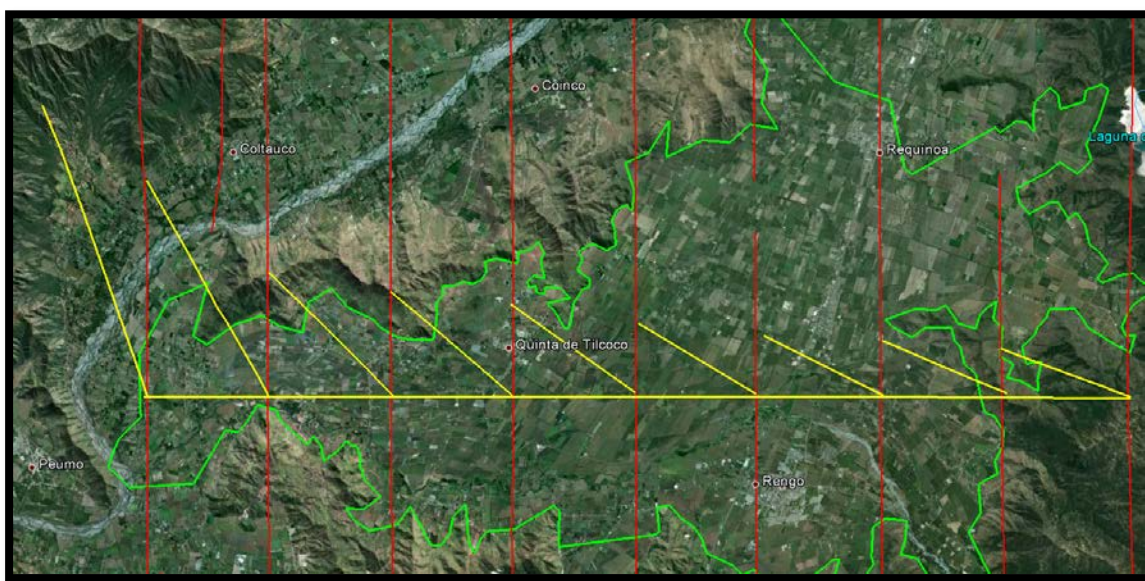
#### 4.2.2.3 Corrección Iluminación

La realización del primer vuelo hiperespectral se realizó entre las 12:48 hrs y las 15:44 hrs, por lo tanto, existe una incompatibilidad de horario y de la ubicación del sol. La **Figura 4.11** entrega los azimut de orientación del sol con respecto a cada la línea de vuelo. Debido a lo anterior, fue necesario corregir esta anomalía, ya que en las áreas de traslape entre líneas de vuelo, las mismas variedades de cultivos o especies arrojaban diferentes firmas espectrales por las variaciones de radiancia (**Figura 4.11**).

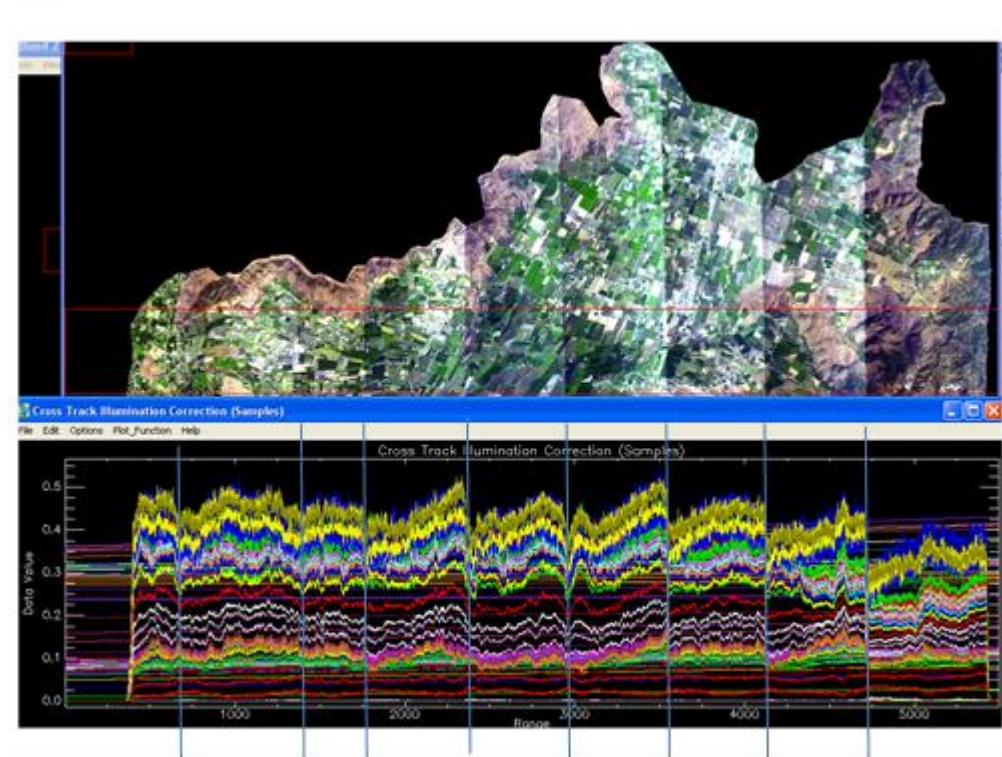
Para lo anterior, se utilizó la aplicación del software *ENVI Crosstrack correction illumination*, herramienta que remueve las variaciones de iluminación, aplicando polinomios que promedian los valores en función de la dirección de la luz (**Figura 4.12**). Sin embargo, cabe señalar que

con esta aplicación no se logró el objetivo de corregir la iluminación y sombra, por lo que fue necesario generar una compensación por línea de vuelo en función de la radiancia teórica.

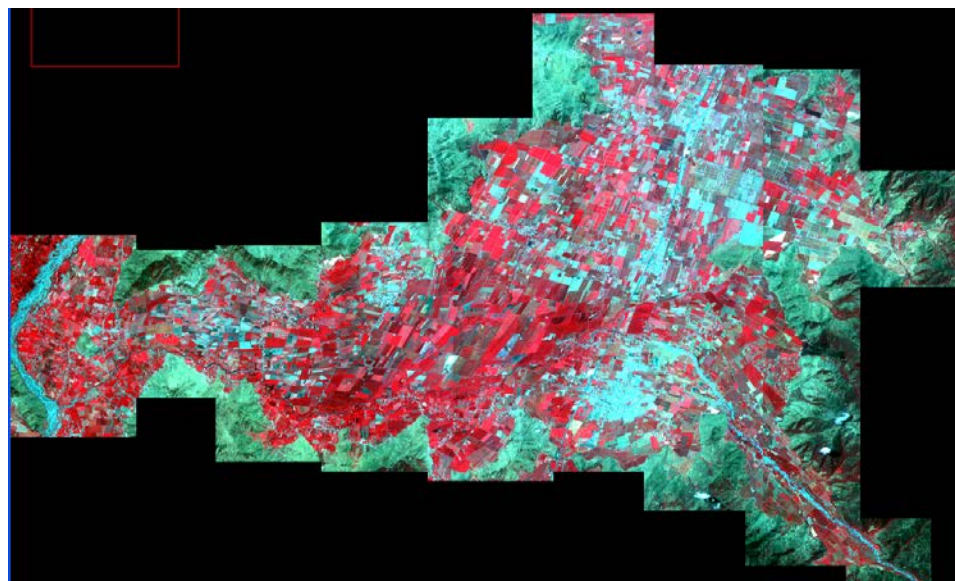
Finalmente, la corrección se realizó programando en el software MATLAB, los valores de cada línea en función de los horarios, posición o azimut del sol y radiancia teórica. Los resultados se pueden apreciar en la **Figura 4.13**.



**Figura 4.11.** Azimut del sol en función de las líneas de vuelo.



**Figura 4.12.** Análisis de luminosidad en zonas de traslape de las líneas de vuelo.



**Figura 4.13.** Mosaico final en color infrarojo.

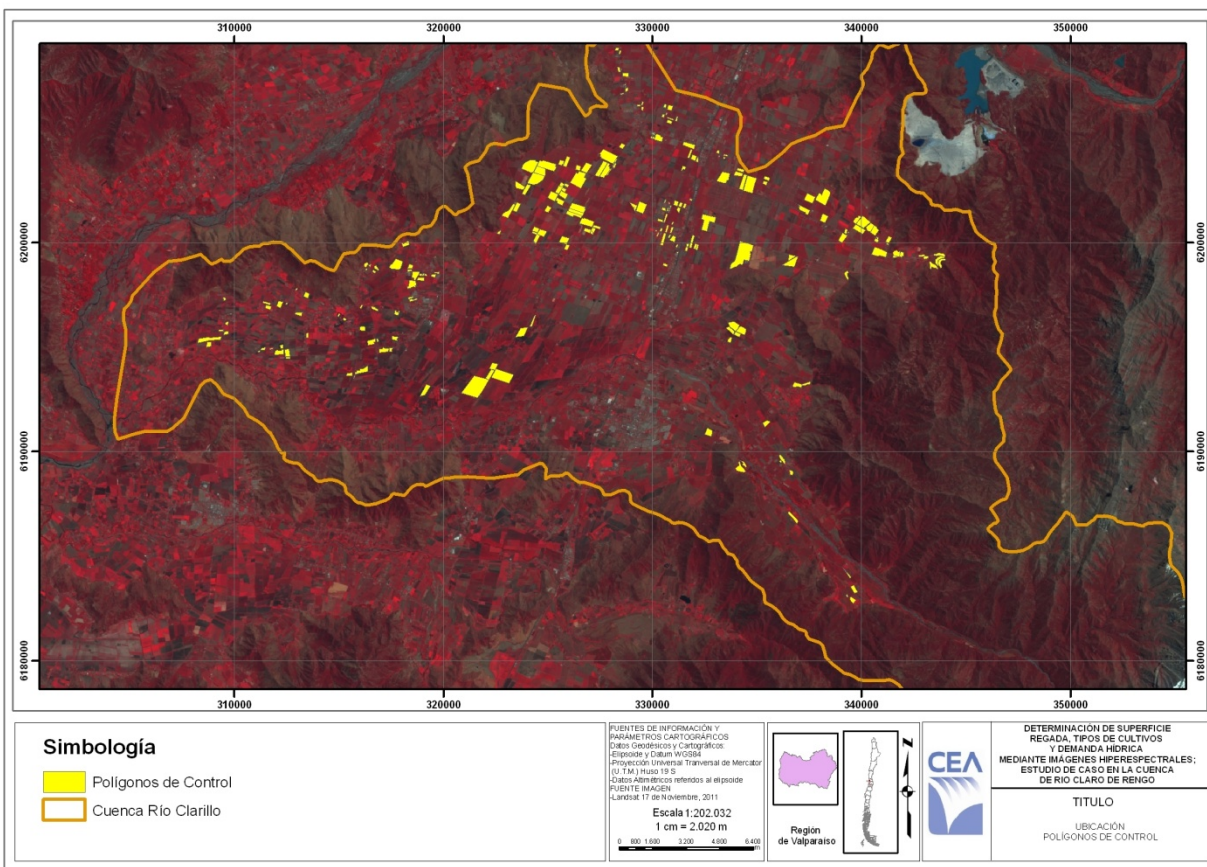
### 4.3 Levantamiento de Información de Campo

En esta etapa correspondió el levantamiento de datos que permitió obtener lo siguiente:

- a) Identificación y Mapeo de Polígonos de Referencia (cultivos principales).
- b) Banco de Firmas Espectrales (cultivos principales).
- c) Firma de Radiancia incidente simultánea al vuelo para corrección atmosférica hiperespectral.

Estas actividades permitieron dar apoyo a la clasificación supervisada de los métodos de imágenes multiespectrales e hiperespectrales, a través de la identificación y caracterización de los tipos de cultivos.

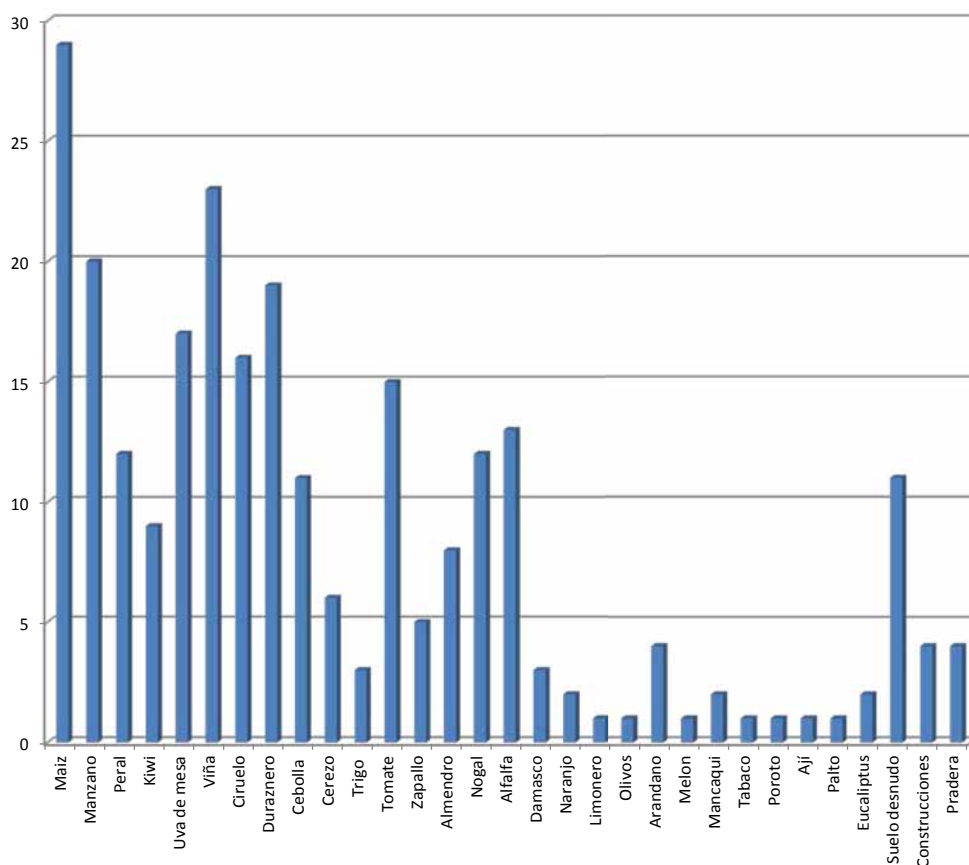
El levantamiento de polígonos de control en terreno, se llevó a cabo durante los meses de diciembre y enero 2012, con una frecuencia de dos veces por semana. Para esto, se diseñó una ficha de campo para llenar en terreno, en la que se registró todas las características de los predios: posición geográfica y altimétrica (X, Y, Z), especie de cultivo, tipo de riego, etc. (**Anexo 5**). Se levantaron un total de 257 polígonos de control (**Figura 4.14**), los que se registraron en fichas individuales.



**Figura 4.14.** Polígonos de color amarillo levantados en terreno.

Los trabajos en terreno se efectuaron con un GPS navegador con una precisión entre  $\pm 5m$ , en el datum WGS84, huso 19, sistema de proyección UTM.

Esta actividad permitió catastrar las diferentes especies de frutales, cultivos, cereales, tipos de suelo, plantas forrajeras, etc., presentes en el área de estudio de la cuenca del río Claro de Rengo (**Figura 4.15**).



**Figura 4.15.** Cultivos identificados en las campañas de terreno.

#### 4.3.1 Levantamiento Radiométrico

El trabajo de medición de radiación de campo permitió obtener la radiancia incidente simultánea al vuelo, para posteriormente corregir y normalizar la reflectancia obtenida del sensor.

Para esto, en forma simultánea a la ejecución del vuelo, se midió en las cercanías del pueblo de Requinoa, la radiación incidente cada 15 minutos con un espectroradiómetro ADS Field Hand Held 2 (**Figura 4.16**). La medición de la radiancia a través del espectroradiómetro, se realizó captando la energía reflejada en el cuerpo de color blanco del espectroradiómetro (blanco completamente puro), el cual refleja el 100% de la radiación incidente, por lo tanto, permitió obtener la intensidad solar instantánea del área de estudio. Las mediciones puntuales se efectuaron desde 1 hora antes del inicio del vuelo (12.50 pm) hasta 1 hora después de finalizado éste (16.30 pm). En total se realizaron 12 mediciones de radiación incidente.

Esta actividad permitió dar apoyo a la clasificación supervisada de las imágenes hiperespectrales para la identificación y caracterización de los tipos de cultivos.



**Figura 4.16.** Uso del espectroradiómetro ASD Field Hand Held 2.

#### **4.3.2 Levantamiento de Reflectancia de Control**

Para revisar el comportamiento reflectivo de los suelos de la cuenca del río Claro, debido a la identificación de disparidad en la tonalidad de suelos de la cuenca y a que se encontraron estudios aludiendo a que en la zona limítrofe entre la comuna de Qta. Tilcoco y San Vicente, existía lo que se conoce como la ex laguna San Vicente, se realizaron estudios con imágenes satelitales para ver el comportamiento espectral de esta zona, comparándola con la zona más alta de la cuenca y se realizó en 10 predios de la cuenca un levantamiento de reflectancia de control, efectuando en éstos mediciones con el espectroradiómetro Field Hand Held 2. En **Anexo 6** se presenta un análisis de los suelos.

#### 4.4 Uso de Información Complementaria

Se consideró el uso de información que complementara los análisis, tales como: imágenes satelitales y fotografías aéreas para fotointerpretación, topografía de modelo digital de terreno, bases de datos de uso de suelo del Catastro Frutícola (CIREN, 2009), Censo Agropecuario 2007 (INE, 2010), red hídrica, infraestructura de riego y catastro de propiedades (CNR, 2012), evapotranspiración de cultivo de referencia ( $ET_0$ ), coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) y eficiencia del método de riego.

La evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) por comunas en la cuenca del río Claro de Rengo, se obtuvo del visualizador electrónico de la Cartografía de la Evapotranspiración Potencial de Chile (CNR, 1997/2000).

Respecto de los valores de  $K_c$  para los cultivos, se utilizaron los valores dados por FAO (1990), los cuales corresponden a valores promedios que se esperan bajo condiciones climáticas estándar. Sin embargo, como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el  $K_c$  es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo de la evapotranspiración del cultivo.

Para la eficiencia de los métodos de riego, se utilizó la información disponible en el Catastro Frutícola (CIREN, 2009) e información hortícola (INE, 2010) de la superficie por cada método de riego, con lo cual se realizó una ponderación de la superficie con la eficiencia de cada método para estimar la demanda hídrica por tipo de cultivo de la cuenca.

#### 4.5 Evaluación de Resultados

La matriz de confusión es una herramienta que permite evaluar el grado de concordancia del método de clasificación y, por lo tanto, se utilizó como criterio de selección del modelo de predicción a utilizar en la clasificación de cultivos. En el **Cuadro 4.1** y en la **Figura 4.17** se señalan las características de la aplicación de esta metodología. Una vez ordenadas las diferentes clases de cultivo (referencia real y estimada por teledetección) se calculó el índice de concordancia ( $K\ kappa$ ) que permitió evaluar la bondad de predicción de cada modelo.

Por lo tanto, la aplicación de matrices de confusión según la clasificación de los tipos de cultivo y/o uso de suelo permitió realizar la evaluación y comparación de la predicción de los enfoques Multiespectral e Hiperspectral.

**Cuadro 4.1.** Matriz de confusión general de n clases.

|                                              |         | REFERENCIA (REAL TERRENO) |         |         |         |     |         |               |
|----------------------------------------------|---------|---------------------------|---------|---------|---------|-----|---------|---------------|
|                                              |         | CLASE 1                   | CLASE 2 | CLASE 3 | CLASE 4 | ... | CLASE N | TOTAL         |
| CLASIFICACIÓN<br>(ESTIMADA<br>TELEDETECCIÓN) | CLASE 1 | X11                       |         |         |         |     |         | X1+           |
|                                              | CLASE 2 |                           | X22     |         |         |     |         | X2+           |
|                                              | CLASE 3 |                           |         | X33     |         |     |         | X3+           |
|                                              | CLASE 4 |                           |         |         | X44     |     |         | X4+           |
|                                              | ...     |                           |         |         |         | ..  |         | ...           |
|                                              | CLASE N |                           |         |         |         |     | Xnn     | Xn+           |
|                                              | TOTAL   | X1+                       | X2+     | X3+     | X4+     | ... | Xn+     | $\sum x_{ij}$ |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |               |                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|
| $K = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}$ <p>en donde:</p> <p>r: es el número de filas en la matriz.<br/> X<sub>ii</sub>: número de observaciones en la fila i y columna i.<br/> X<sub>i+</sub>: totales marginales de la fila i.<br/> X<sub>+i</sub>: totales marginales de la columna i.<br/> N: número total de píxeles de referencia.</p> | VALOR DE<br>K | FUERZA DE LA<br>CONCORDANCIA |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | < 0.20        | Pobre                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.21 – 0.40   | Débil                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.41 – 0.60   | Moderada                     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.61 – 0.80   | Buena                        |

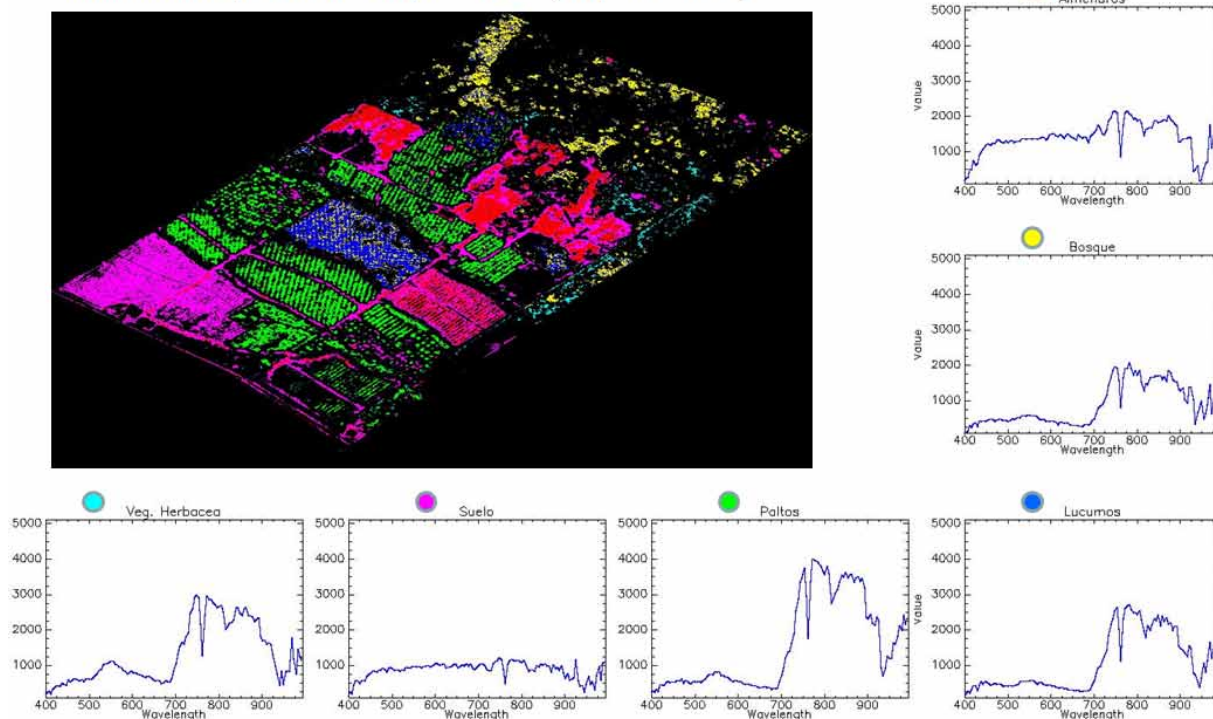
**Figura 4.17.** Aplicación del índice de concordancia (K) para evaluar la bondad de precisión del modelo de clasificación.

#### 4.6 Modelo de Clasificación de Tipos de Cultivos

Las imágenes hiperspectrales adquiridas ofrecieron la oportunidad de reconocer las firmas espectrales para cada uno de los píxeles de la escena, por lo tanto, se logró caracterizar los tipos de cultivo específicos asociados al área de estudio.

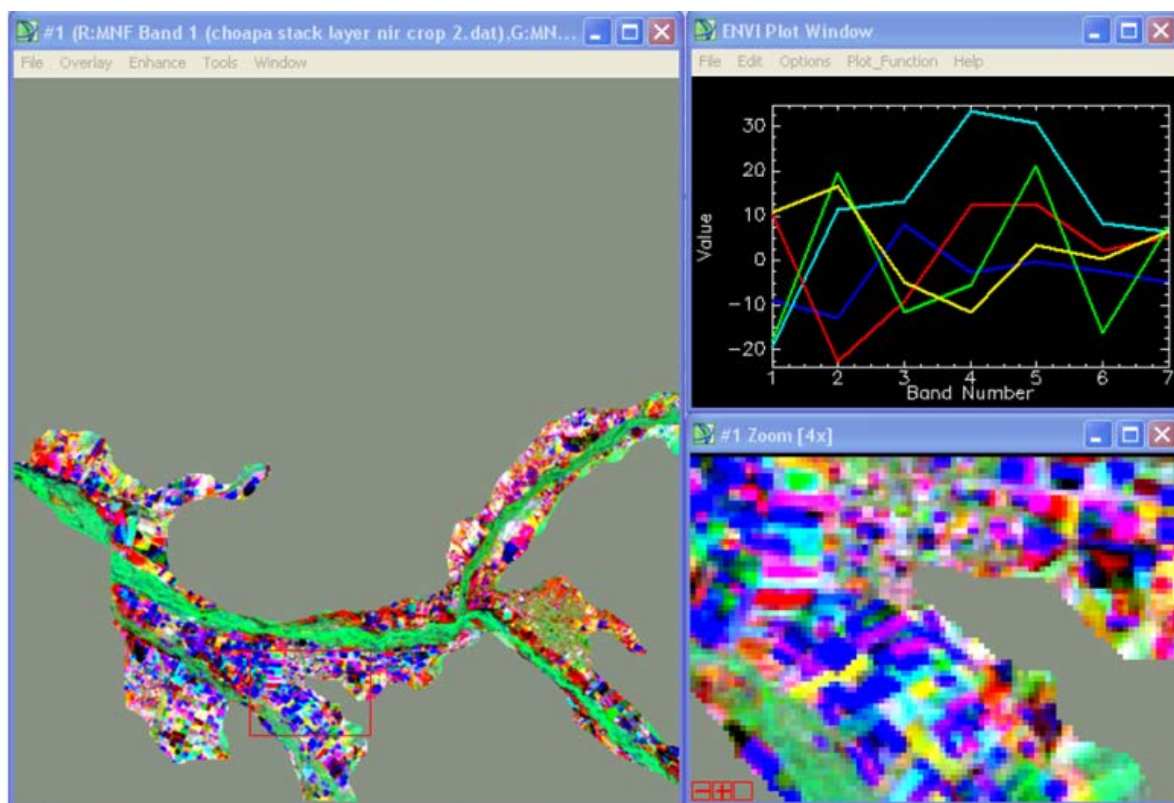
Una vez determinado el banco de firmas espectrales de los tipos de cultivos de interés, se procedió a efectuar una clasificación supervisada del resto de la escena, lo que permitió estimar el tipo de cultivo (**Figura 4.18**).

### Clasificación por firmas espectrales (Supervisada)



**Figura 4.18.** Clasificación supervisada por firmas espectrales de radiancia de cultivos.

En la **Figura 4.19** se muestra una aplicación real de una secuencia de imágenes Landsat de un valle de la zona centro-norte de Chile, que presentan predios con distinto comportamiento temporal de la reflectividad infrarroja. De esta forma, con la disponibilidad de imágenes obtenidas, se trabajó con aplicaciones estadísticas (MNF, PCA) para extraer la información más relevante de cada firma temporal. Se observa la identificación de cinco patrones con una distinta firma temporal (colores rojo, azul, verde, amarillo y cian), que se relacionan con el mapeo espacial de cada predio ubicado en el área de estudio. La supervisión en terreno en combinación con las características generales de fenología de cada cultivo, permitió establecer el número de clases de cultivos identificables con esta metodología.



**Figura 4.19.** Aplicación de firmas temporales basadas en reflectividad infrarroja de imágenes Landsat. Zona centro-norte de Chile (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.7 Estimación de la Superficie Bajo Riego y Áreas Cultivadas por Tipo de Cultivo

En base a la imagen clasificada, se obtuvieron mediante el software SIG, la superficie bajo riego de la cuenca y las áreas asociadas a cada tipo de cultivo.

#### 4.8 Estimación de Demanda Hídrica por Tipo de Cultivo

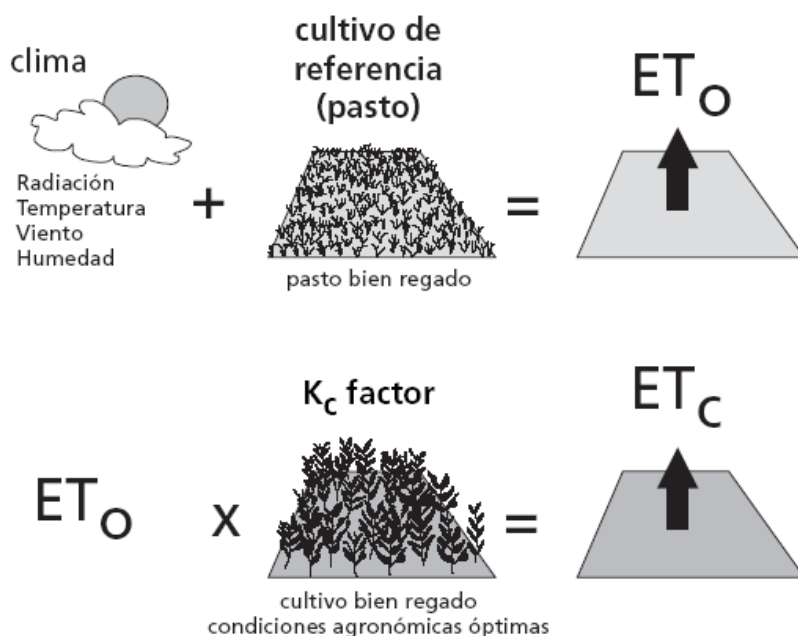
La estimación de la demanda hídrica de cada uno de los cultivos identificados en la cuenca de estudio a través de las imágenes multiespectrales e hiperspectrales, se realizó considerando la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>), la cual se determinó a partir de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), según la siguiente expresión:

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Los conceptos de evapotranspiración incluyen dos definiciones que se muestran en la **Figura 4.20**:

- Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>).
- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>).

Donde, ET<sub>o</sub> es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera, y ET<sub>c</sub> se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas, con un excelente manejo y adecuado aporte de agua, y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas.



**Figura 4.20.** Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) y cálculo de la evapotranspiración bajo condiciones estándar (ET<sub>c</sub>).

Para obtener el volumen de agua utilizado por cada cultivo en una hectárea se utilizó la siguiente relación:

$$\text{Demanda Hídrica (m}^3 \text{ há}^{-1}\text{)} = \frac{(ET_o \cdot K_c)}{Eff}$$

Conociendo el área que cada cultivo o grupo de cultivo ocupa en la cuenca estudiada, a través de la teledetección se estimó el volumen teórico de agua que requiere el área de estudio. De este modo, se obtuvo la demanda hídrica de cada mes del año y la distribución temporal de esta demanda.

## 5 ANÁLISIS Y RESULTADOS

El análisis de las imágenes multiespectrales e hiperespectral consideró un proceso de exploración de datos para estudiar la distribución de éstos, y en una segunda etapa, la selección de las firmas espectrales para realizar la clasificación supervisada.

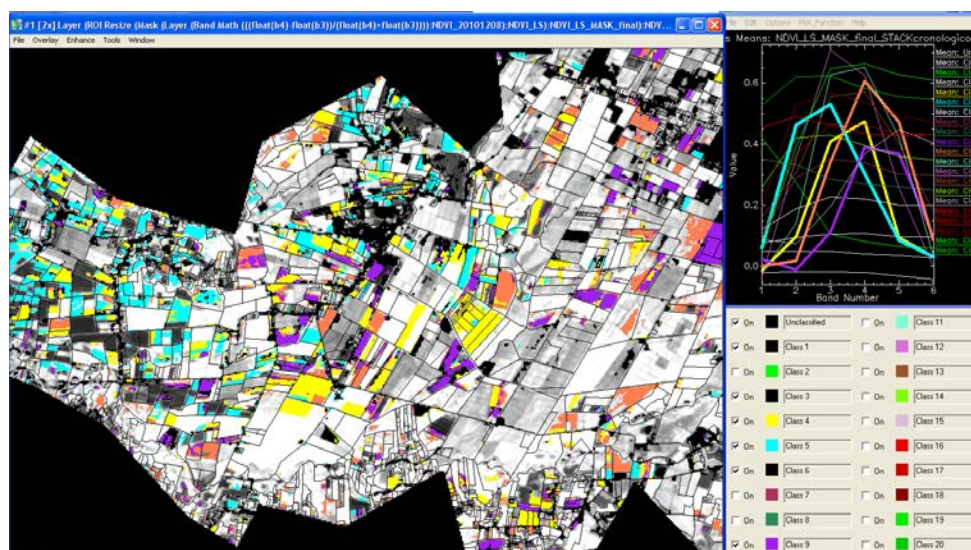
La información sobre la cual se trabajó en la primera escena (16 enero 2012) fue el mosaico hiperespectral levantado, que se muestra en los **Planos N°1 y N°2**, representados en formatos de color verdadero y falso color infrarrojo. En tanto, la imagen del mosaico de la 2ª escena (14 mayo 2012) se muestra en el **Plano N° 9 y N° 10**, en falso color infrarrojo y color verdadero. Respecto a la información multiespectral, se presenta en el **Plano N°3** con la secuencia multitemporal de NDVI.

### 5.1 Análisis Multiespectral Temporal con Imágenes Satelitales

#### 5.1.1 Exploración de datos

La clasificación no-supervisada consistió en la utilización de los algoritmos K-MEANS e ISODATA. Estos métodos permitieron el análisis de un conglomerado de datos con patrones similares. Se asignó un número determinado de clases y se realizaron iteraciones para ir agrupando firmas temporales, que tuvieran una evolución temporal acorde a los cultivos principales de la cuenca.

Las clases genéricas obtenidas con el método no-supervisado, fueron llevadas al mapa de la cuenca donde se observa su distribución espacial. Un ejemplo de esto se observa en la **Figura 5.1**, donde se destacan 4 firmas de cultivos de comportamiento similar en cuanto al índice NDVI, pero con distinta temporalidad de sus valores mínimos y máximos.



**Figura 5.1.** Resultado de clasificación no-supervisada y agrupación de patrones similares.

### 5.1.2 Firmas temporales y clasificación

En el caso de las firmas temporales se analizaron uno por uno los resultados obtenidos a través de los polígonos de control. Debido al desfase entre la fecha de levantamiento de los polígonos (temporada 2012) y la composición de la imagen multitemporal (temporada 2011); en el caso de los cultivos anuales (hortalizas y cereales), podría eventualmente llevar a error, debido a la rotación de cultivos en algunos predios agrícolas. Las curvas que se presentan a continuación expresan el vigor fluctuante durante la temporada agrícola 2010-2011, particularmente los registrados en los meses de septiembre, noviembre, diciembre, enero y abril. Las curvas se obtuvieron a partir de los valores resultantes del índice vegetacional NDVI con imágenes Landsat.

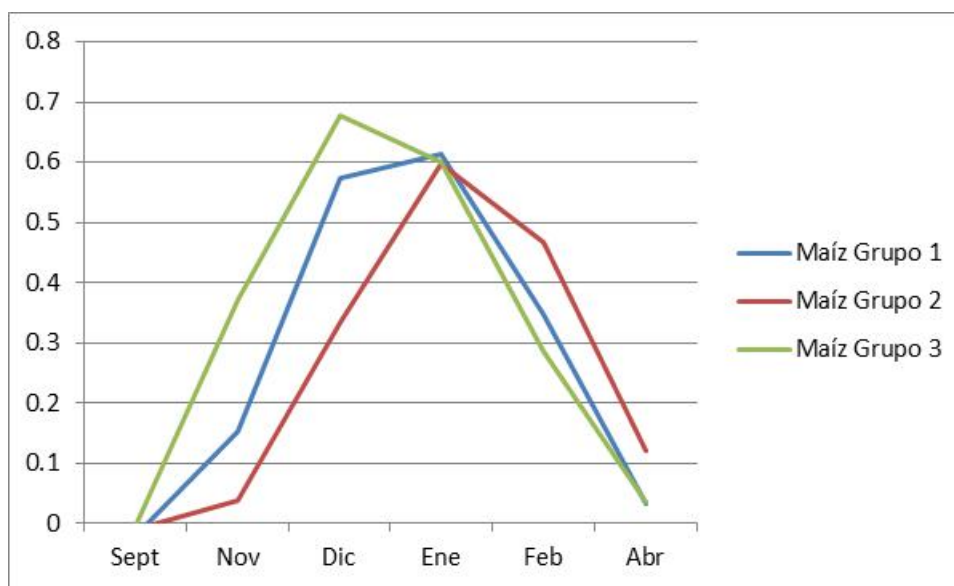
#### 5.1.2.1 Maíz

El cultivo del Maíz, como se describe en la sección cultivos, se caracteriza por presentar una temporalidad marcada por su ciclo anual. El cultivo, se logra diferenciar del suelo a través del índice NDVI unas semanas después de realizada la siembra, cuando se observan las primeras hojas. Luego su vigor crece de manera acelerada hasta alcanzar su peak en verano, donde comienza a disminuir la intensidad de NDVI hasta nuevamente alcanzar valores cercanos a 0, lo que coincide con el periodo final del cultivo. El comportamiento de la curva es similar a una parábola.

Debido a que los agricultores realizan la labor de siembra en distintas fechas en la zona de estudio, además de los distintos manejos (tipo de riego, control de malezas, variedad del cultivo) y condiciones particulares del predio (tipo de suelo), se observó que las firmas

temporales obtenidas presentan variaciones, tanto en la intensidad como en la fecha en que se logra el peak de mayor vigor. Por lo anterior, se establecieron tres grupos de firmas temporales para analizar el cultivo.

La principal causa de la variación del vigor en el Maíz es la fecha de siembra, lo que se deduce por la diferencia en la temporalidad observada entre el grupo 3 y grupo 2 (**Figura 5.2**). Por un lado, los maíces pertenecientes al grupo 3, comienzan antes su actividad, demostrado por el aumento temprano del NDVI con relación a los demás grupos. Este aumento temprano de este grupo se explica por un fecha de siembra cercana a finales de agosto. Esta fecha de siembra más temprana que los casos anteriores, genera que el cultivo alcance su tamaño máximo y un mayor valor de NDVI en el mes de diciembre. El caso contrario ocurre con lo observado para los maíces pertenecientes al grupo 2, donde el aumento de NDVI se registra desde el mes de noviembre (fecha de siembra estimada mediados de septiembre). Esta fecha de siembra provoca que el cultivo alcance su máximo vigor de manera tardía, con respecto a los demás grupos (mes de enero). Además, la siembra tardía genera que el cultivo logre un valor de NDVI más bajo que lo observado para el grupo de maíces más tempranos.



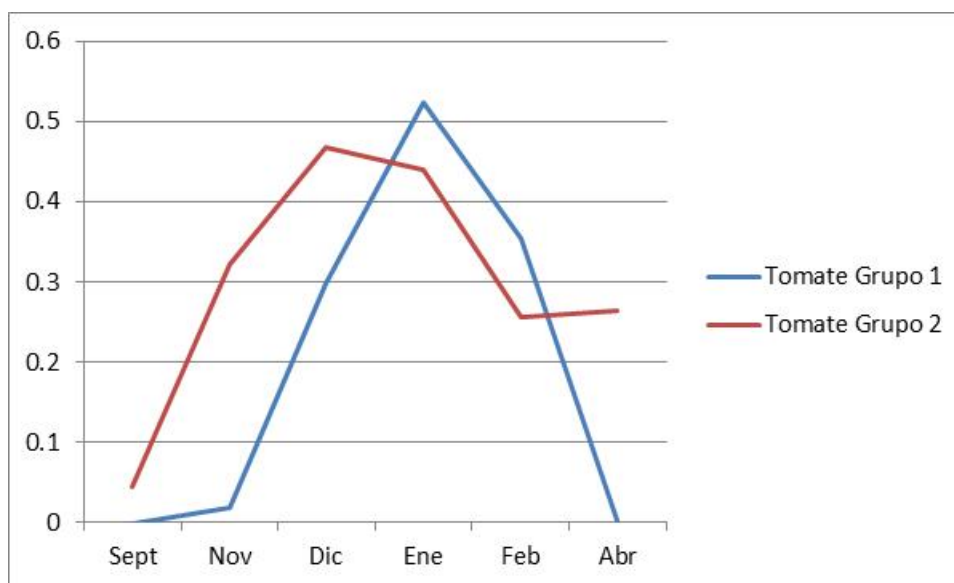
**Figura 5.2.** Firmas temporales del Maíz por grupos.

#### 5.1.2.2 Tomate

El cultivo del Tomate tiene distintas fechas de transplante al igual que la siembra de Maíz, lo que genera que se diferencien dos grupos de firmas temporales en el cultivo (**Figura 5.3**).

El grupo 2 de firmas temporales de tomate se caracteriza por presentar un aumento temprano del NDVI, debido probablemente al transplante ocurrido a finales de agosto, lo que provoca que

se alcance el mayor vigor en el mes de diciembre. El grupo 1 de firmas de tomate presenta un desfase con respecto al anterior, debido a un transplante del cultivo más tardío que el grupo 2, probablemente en el mes de septiembre. Además, alcanza el vigor más alto en el mes de enero.

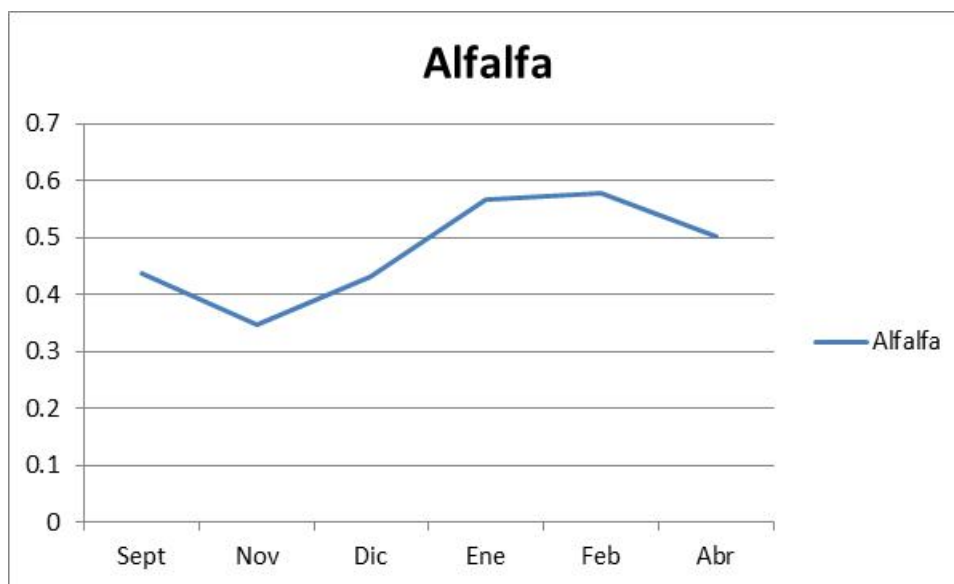


**Figura 5.3.** Firmas temporales de NDVI promedio para tomates.

#### 5.1.2.3 Alfalfa

La Alfalfa es un cultivo perenne, el cual presenta una cobertura de aproximadamente 100% del suelo en su estado de máxima producción. Las variaciones posibles en el vigor del cultivo se deben principalmente a los cortes del cultivo que se realizan para obtener la cosecha, la cual es generalmente utilizada como alimento para los animales. En general, no existe una fecha regular para realizar esta labor (corte), sin embargo se puede decir que el momento de mayor actividad del cultivo se da en el noviembre-diciembre, que debiese coincidir con la época de corte.

La curva temporal de NDVI de la alfalfa responde de forma lógica a la fenología del cultivo (**Figura 5.4**). Es una curva que se mantiene elevada debido al gran cubrimiento del suelo por parte de las plantas, y tampoco presenta un ciclo marcado, debido a que es una especie de hábito perenne, es decir, no renueva sus hojas de manera drástica en la época de invierno.



**Figura 5.4.** NDVI temporal promedio cultivo Alfalfa.

#### 5.1.2.4 Vid - Uva de mesa

Como todo frutal de hoja caduca, la Uva de mesa presenta un ciclo anual, marcado por el receso invernal en la época de bajas temperaturas, notado por un valor de NDVI bajo, y la época de alta actividad durante primavera y verano, NDVI alto.

El sistema de conducción de la Uva de mesa es determinante en el comportamiento temporal del NDVI, ya que permite un cubrimiento importante del suelo, y un alto vigor de la planta, durante el periodo de mayor actividad.

El comportamiento temporal del NDVI del cultivo de Vid para Uva de mesa, representado en el **Figura 5.5**, es consistente con la fenología esperada para un frutal de hoja caduca.

A diferencia del cultivo del Maíz, que también presenta un ciclo anual, la vid comienza su actividad fotosintética antes, lo que se refleja en el valor positivo de NDVI ( $\text{NDVI} = 0,1$ ) en septiembre. También, el aumento de NDVI desde septiembre hasta diciembre (mes que alcanza su peak de vigor), es menos acelerado que el Maíz. Otra diferencia notoria es que el vigor de la Vid se mantiene constante hasta abril, mes en el cual recién comienza la disminución de vigor, y el receso invernal.



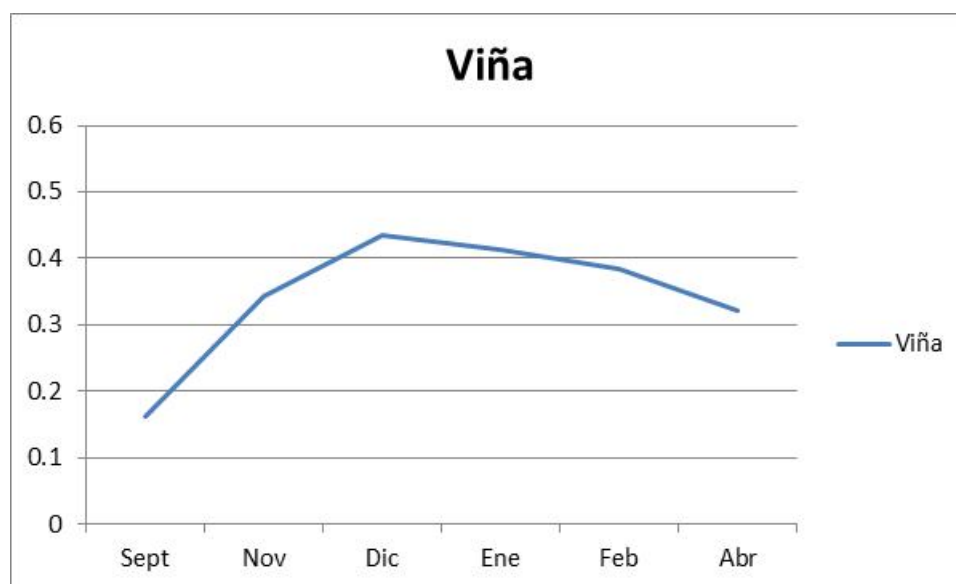
**Figura 5.5.** NDVI temporal promedio de Uva de mesa.

#### 5.1.2.5 Vid – Viña

A pesar de ser la misma especie que la uva de mesa, las variedades de vid utilizadas para la elaboración de vinos tienen un sistema de conducción distinto a las utilizadas para el consumo de uva de mesa, lo que provoca que su comportamiento temporal sea también diferente.

Para la elaboración de un vino de calidad se requiere, entre otros factores, una disminución en el vigor de la planta para concentrar la energía fotosintética en los frutos y no en el crecimiento vegetativo. Por lo anterior, el sistema de conducción más frecuentemente utilizado es la espaldera, el cual permite que la planta permanezca con un bajo tamaño y con un vigor controlado.

En la curva mostrada en la **Figura 5.6**, se observa el comportamiento temporal de la viña, el cual está fuertemente influenciado por el efecto del suelo y el bajo vigor debido al sistema de conducción, lo que se ve reflejado en el bajo valor de NDVI a nivel general. A pesar de lo anterior, la curva temporal de NDVI de la viña corresponde a lo esperado para un frutal de hoja caduca, es decir, existe un comportamiento temporal en donde se observan los meses donde comienza la actividad de la planta y también donde disminuye (receso invernal).



**Figura 5.6.** NDVI temporal promedio Viñas.

#### 5.1.2.6 Frutales hoja caduca (Almendro, Cerezo, Ciruelo, Durazno, Manzano, Nogal, Peral)

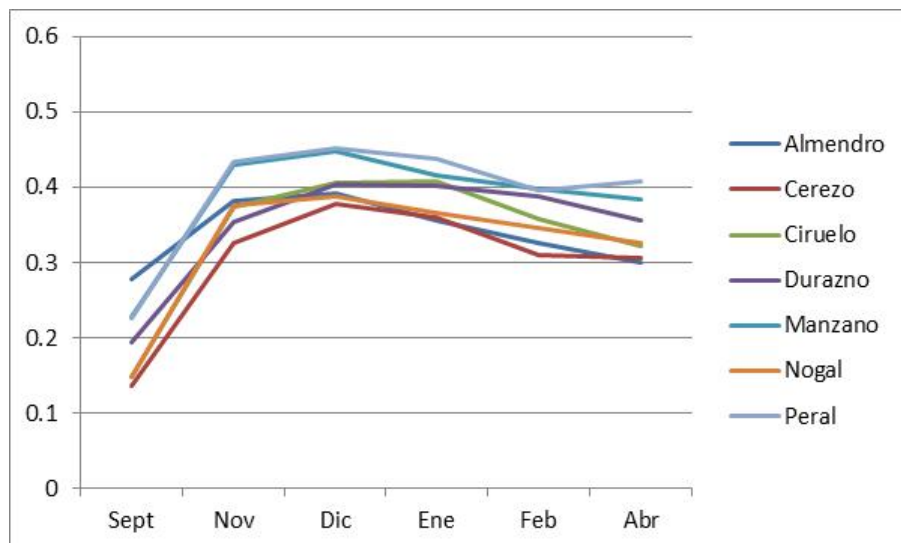
Al analizar las firmas de los frutales de hoja caduca, se observó que presentan un mismo comportamiento como también una misma intensidad en los valores de NDVI. Lo anterior, provoca que su separabilidad sea escasa, al analizarlos en teledetección.

Como se observa en la **Figura 5.7**, las firmas temporales de NDVI para las distintas especies de frutales de hoja caduca presentan un comportamiento esperado para la fenología que tienen. El hecho que sus curvas sean muy similares, se debe a la variación que presenta cada especie frutal en lo que se refiere a su manejo en el predio agrícola. Por ejemplo, se observó en terreno cultivos en los cuales se evidenciaba un manejo de la maleza entre hileras y en otros no, lo que influye en la intensidad del índice vegetacional utilizado. Las distintas intensidades de poda que son particulares para cada explotación agrícola, también genera que las especies frutales presenten un comportamiento similar desde el punto de vista de la intensidad de índice NDVI.

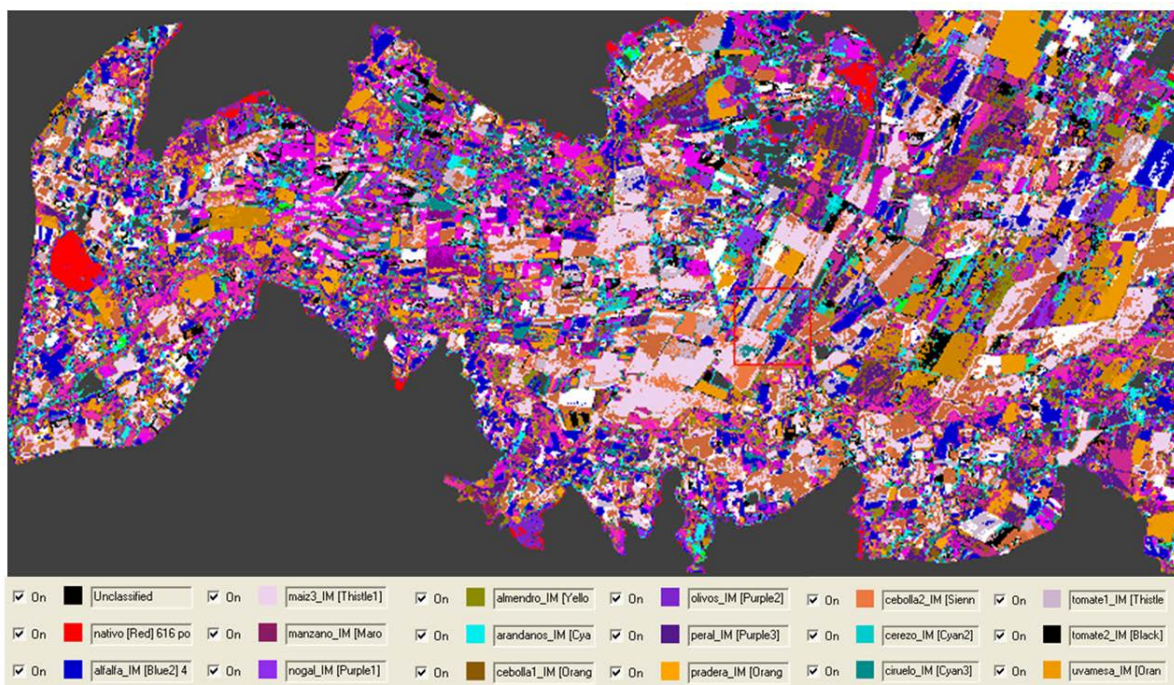
Comparando las firmas obtenidas para el grupo de frutales de hoja caduca y la Vid – Uva de mesa, se deduce que presentan un comportamiento similar, coincidente con la fenología de estos frutales. Sin embargo, la Uva de mesa logra diferenciarse debido a la mayor cobertura del suelo, que le permite su sistema de conducción. Esto provoca que el vigor registrado a través del índice vegetacional NDVI sea elevado, ya que el efecto del suelo se reduce considerablemente, lo que no ocurre con los demás frutales, que tienen un mayor espaciamiento entre hileras.

Con lo anterior, una vez reconocidos los principales patrones temporales de cultivos, se aplicó una clasificación supervisada de máxima verosimilitud (método Maximum Likelihood) en toda la

zona estudio. En la **Figura 5.8** se muestra un resultado gráfico de la clasificación, donde se predice la ubicación espacial de los tipos de cultivos que tienen mayor probabilidad de ser incluida en la clase generada por los polígonos de entrenamiento.



**Figura 5.7.** NDVI temporal de grupo frutales de hoja caduca.

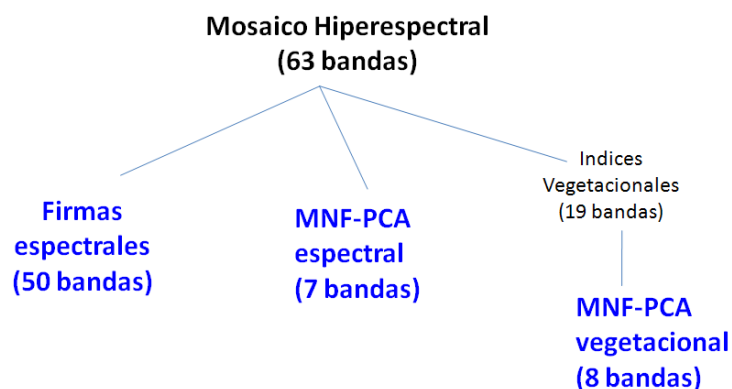


**Figura 5.8.** Clasificación supervisada de cultivos mediante el uso de firmas temporales.

## 5.2 Análisis Hiperespectral Espacial con Imagen Aerotransportada

### 5.2.1 Exploración de datos

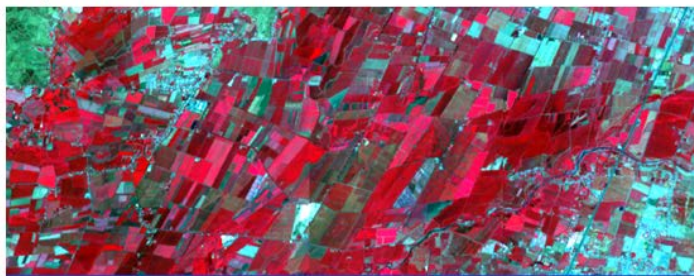
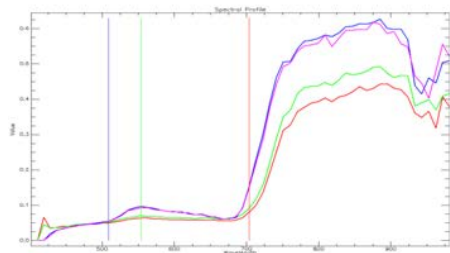
En el caso de los datos hiperespectrales en que se cuenta con un número mayor de bandas (63 bandas), la exploración de datos fue realizada por medio de la aplicación de clasificaciones no-supervisadas sobre diferentes bases de información (KMEANS e ISODATA). Se generaron tres bases de información derivada de la información espectral, con el objetivo de buscar la mejor combinación y poder de clasificación de los cultivos. La información primaria sobre la cual se trabajó fue un rango de 50 bandas de reflectancia, que constituyen la base de firmas espectrales (reflectancia v/s longitud de onda). La segunda fuente de información es una reducción de dimensiones de componentes principales mediante el método Minimum Fraction Noise (MNF), que permite eliminar la información redundante. La tercera base de información fueron los índices vegetacionales que proporcionan información fisiológica de la vegetación (verdor, vigor, pigmentos, eficiencia de uso de luz, etc.). En la **Figura 5.9** se muestra un esquema con las bases de información exploratoria, y en la **Figura 5.10**, se muestra un ejemplo de firmas espectrales y la curva MNF con el aporte de información por bandas.



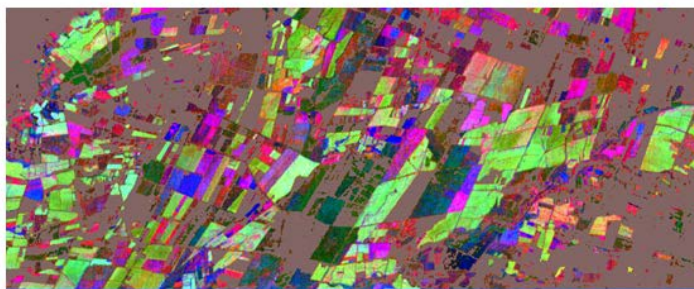
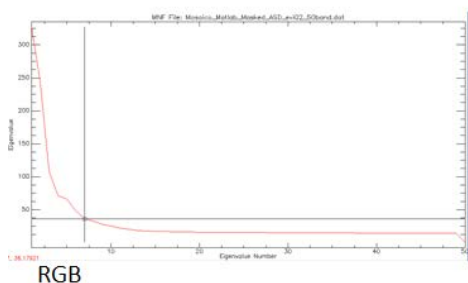
**Figura 5.9.** Esquema de trabajo exploratorio de información.

En base a cada grupo de información primaria y derivada, se aplicaron métodos de clasificación no-supervisada y supervisada, para evaluar cuál de ellas presentaba la mejor capacidad de discriminar cultivos. En el siguiente ejemplo de la **Figura 5.11** se observa una clasificación no-supervisada, donde se observan las diferencias en el patrón de reflectancia de cada una de ellas.

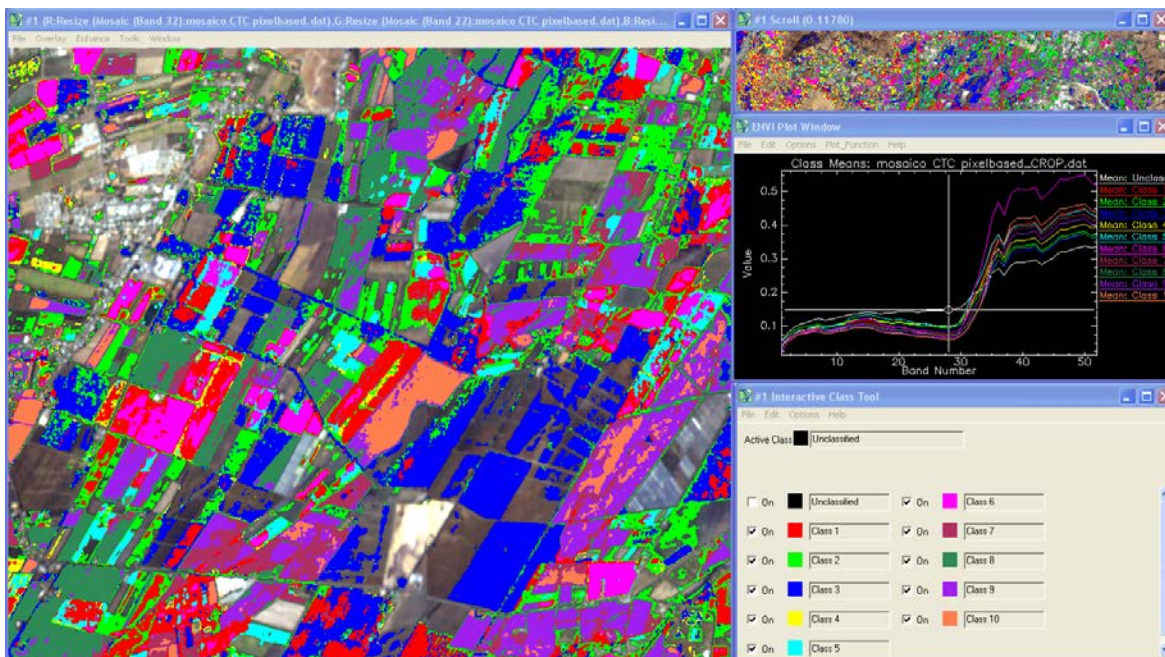
### Firma espectral 63 bandas



### MNF (Componentes principales)



**Figura 5.10.** Reducción de dimensiones por método de componentes principales (MNF).

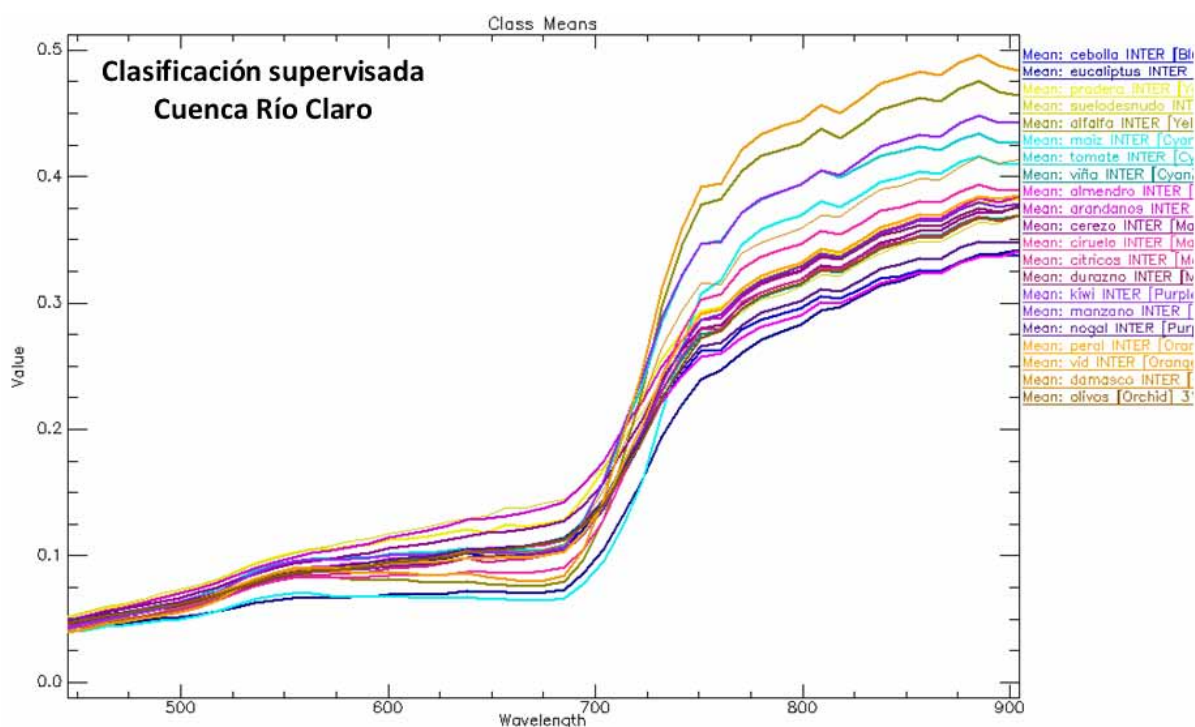


**Figura 5.11.** Clasificación no-supervisada de la imagen hiperespectral.

### 5.2.2 Firmas espectrales y clasificación

En esta etapa se replantearon los polígonos de entrenamiento levantados en terreno, y adicionalmente los polígonos del catastro frutícola, y se obtuvieron las firmas espectrales promedio por tipo de cultivo (banco de firmas espectrales), como se muestra en la **Figura 5.12**.

Posteriormente, se efectuó la clasificación supervisada con el método de máxima verosimilitud (maximum likelihood), para cada una de las bases de información espectral y vegetal, con lo cual se generaron los mapas de distribución espacial de los tipos de cultivos, como el ejemplo de la **Figura 5.13** donde se clasificó el cultivo de maíz.



**Figura 5.12.** Firmas espectrales por tipo de cultivos (Banco de Firmas espectrales).



**Figura 5.13.** Clasificación supervisada de cultivo de maíz.

### 5.3 Evaluación de Resultados

Los resultados de ambos métodos (multiespectral e hiperespectral) fueron evaluados con el uso de una matriz de confusión y valor de concordancia de índice Kappa. Por efectos prácticos, los mismos polígonos de entrenamiento se utilizaron para esta verificación. Se consideró la evaluación de los resultados por cultivos en forma separada, y por agrupación de cultivos de comportamiento similar. En el caso de la información hiperespectral se agregaron resultados de clasificación de las bases de dimensiones reducidas y vegetacionales.

Los resultados se resumen en el **Cuadro 5.1**, donde se observa que el mejor desempeño en la clasificación fue del método hiperespectral mediante el uso de firmas espectrales de agrupación de tipos de cultivos, sin embargo el nivel de concordancia sólo es moderada ( $K=0,59$ ).

**Cuadro 5.1.** Resultados comparativos del índice de concordancia (Kappa) de las clasificaciones supervisadas.

|                | Base de Información                                 | Indice Kappa |
|----------------|-----------------------------------------------------|--------------|
|                |                                                     |              |
| MULTIESPECTRAL | Firmas temporales (6 bandas)<br>27 CLASES           | 0.23         |
|                | Firmas Temporales (6 bandas)<br>13 CLASES           | 0.43         |
| HIPERESPECTRAL | Firmas espectrales<br>(50 bandas) 21 CLASES         | 0.49         |
|                | Firmas espectrales<br>(50 bandas) 16 CLASES         | 0.59         |
|                | Firmas MNF-PCA espectral<br>(7 bandas)              | 0.34         |
|                | Firmas MNF-PCA<br><u>vegetacional</u><br>(8 bandas) | 0.31         |

#### 5.4 Modelo de Clasificación de Tipos de Cultivos

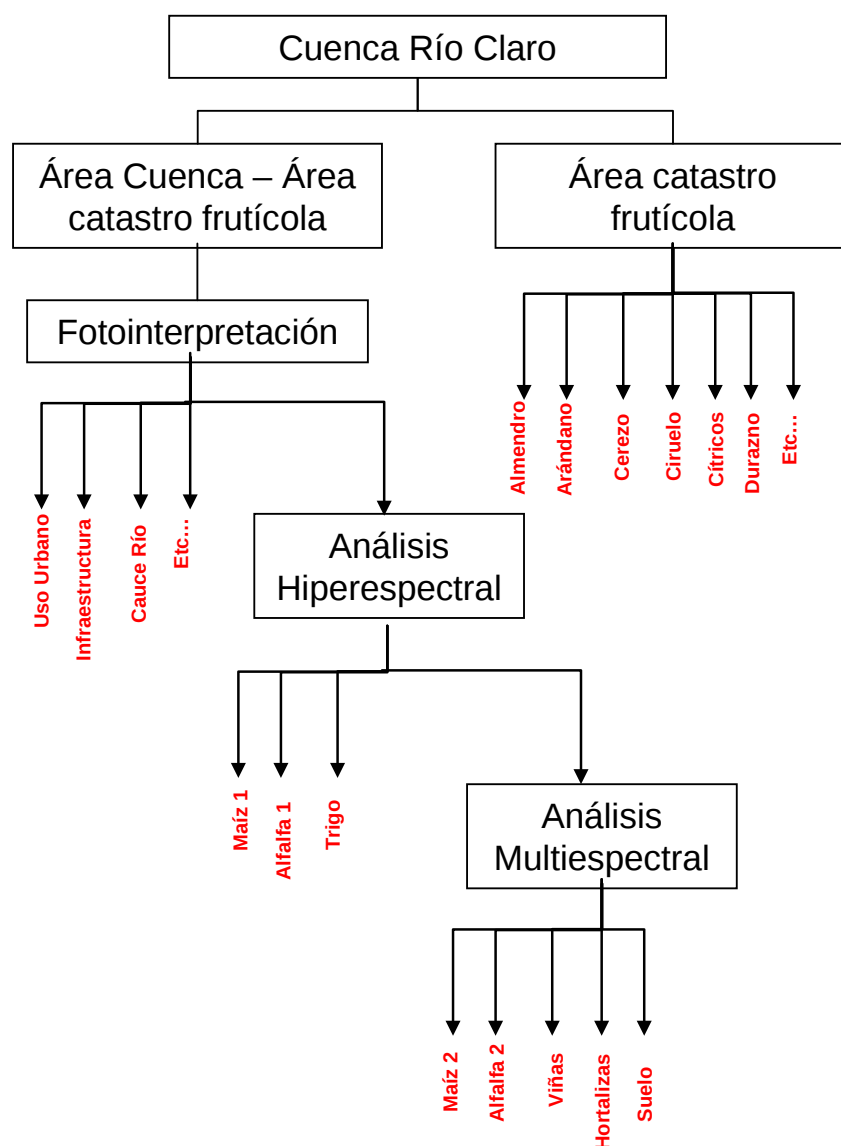
Cabe señalar que las especies frutales dominantes en la cuenca pertenecen al grupo de frutales de hoja caduca (Cerezo, Ciruelo, Vid, Nogal, Almendro, Duraznero, Kiwi, Manzano y Peral), las cuales presentan un comportamiento temporal y espectral similar, lo que provocó que la identificación de estas especies sea muy difusa. Debido a lo anterior, para estas especies se utilizó como información base la superficie de uso del suelo de frutales del Catastro Frutícola (CIREN, 2009). En el **Plano N°4** se muestra la distribución espacial de los predio frutícolas contenidos en el catastro.

Basándose en los resultados de los métodos de clasificación, se generó un modelo de clasificación que incluyera el complemento de ambos métodos hiperespectral y multiespectral. Esta aproximación consistió en efectuar la clasificación con el método hiperespectral de las especies que presentan mayor separabilidad, y posteriormente efectuar la clasificación de la información restante, por medio de clasificación multitemporal por comportamiento fenológico.

Durante el proceso de clasificación se identificaron elementos que alteraban o sobreestimaban los resultados. Debido a lo anterior, se eliminaron elementos como las ciudades, carreteras, caminos, cerros, caja del río, etc.

Este procedimiento fue realizado en cascada, comenzando del área total de la cuenca, a la cual se restó el área de catastro frutícola. La información restante fue clasificada por firmas espectrales para obtener el área de maíz, alfalfa y trigo, que presentaron alta separabilidad de sus firmas. El resto de los cultivos fue separado mediante el uso de las firmas temporales, de acuerdo a su comportamiento fenológico, según se indica en la **Figura 5.14**.

El resultado de esta clasificación es presentado en el **Plano N°5**.



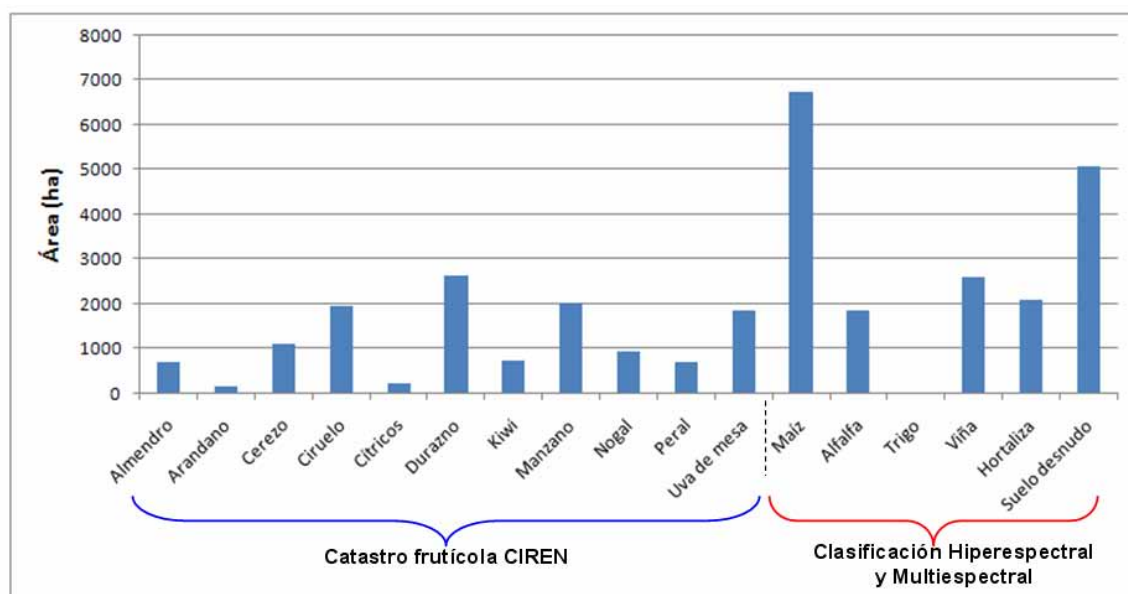
**Figura 5.14.** Esquema de clasificación complementaria con uso de imágenes hiperespectrales y multiespectrales.

## 5.5 Estimación de Área y Tipos de Cultivo

Como se mencionó anteriormente, la obtención de la superficie de los frutales en la cuenca del río Claro de Rengo, se realizó utilizando la información del catastro frutícola (CIREN, 2009). El resto de la cuenca cultivable (cultivos de rotación, viñas y suelo desnudo) fue obtenida del proceso de clasificación supervisada de imágenes hiperspectrales y multiespectrales.

El área total de estudio en la cuenca del río Claro de Rengo fue de 43.492 ha, de las cuales se obtuvieron 12.018 ha de áreas no cultivables correspondientes a zona urbana, carreteras, cauce del río, infraestructura, etc. En consecuencia, el área cultivable se calculó en 30.401 ha de las cuales un 39,3 % corresponde a frutales, 43,9% a cultivos de rotación y viñas, y un 16,7% a suelo desnudo.

El detalle de la distribución de estas áreas se muestra en la **Figura 5.15** y en el **Cuadro 5.2**.



**Figura 5.15.** Superficie en hectáreas de los cultivos en la cuenca del río Claro.

**Cuadro 5.2.** Superficie en hectáreas de los cultivos en la cuenca del río Claro.

| Tipo de Cultivo | Área (ha)      | Porcentaje %  |
|-----------------|----------------|---------------|
| Almendro        | 657.2          | 2.2%          |
| Arándano        | 127.3          | 0.4%          |
| Cerezo          | 1047.7         | 3.4%          |
| Ciruelo         | 1805.2         | 5.9%          |
| Cítricos        | 196.5          | 0.6%          |
| Durazno         | 2400.7         | 7.9%          |
| Kiwi            | 660.7          | 2.2%          |
| Manzano         | 1831.2         | 6.0%          |
| Nogal           | 901.7          | 3.0%          |
| Peral           | 629.3          | 2.1%          |
| Uva de mesa     | 1713.2         | 5.6%          |
| Maíz            | 6758.0         | 22.2%         |
| Alfalfa         | 1848.4         | 6.1%          |
| Trigo           | 26.3           | 0.1%          |
| Viña            | 2623.5         | 8.6%          |
| Hortaliza       | 2089.1         | 6.9%          |
| Suelo desnudo   | 5085.7         | 16.7%         |
| <b>TOTAL</b>    | <b>30401.8</b> | <b>100.0%</b> |

## 5.6 Estimación de Demanda Hídrica por Tipo de Cultivo

La estimación de la demanda hídrica por tipo de cultivo se presenta en dos acápite (área de estudio y sección de riego) a continuación.

### 5.6.1 Estimación de demanda hídrica por área de estudio

Con la información recopilada de  $ET_0$  por comuna,  $K_c$  inicial y máximo, eficiencia del método de riego y la superficie correspondiente a cada cultivo, se calculó la demanda hídrica teórica de cada especie vegetal en la cuenca estudiada, para los periodos de crecimiento inicial y de máxima demanda hídrica.

Utilizando los valores de  $K_c$  inicial de cada cultivo y la evapotranspiración potencial de los meses de Septiembre y Octubre para cada comuna perteneciente a la cuenca del río Claro, se calculó la demanda hídrica para el periodo inicial de la temporada agrícola. En tanto con los valores de  $K_c$  máximo de cada cultivo y la  $ET_0$  de los meses de diciembre y enero de cada comuna perteneciente a la cuenca, se calculó la demanda hídrica máxima de la temporada agrícola.

El mapa de distribución de demanda hídrica en la cuenca se presenta en los **Planos N°6 y N°7**.

Del **Cuadro 5.3** se obtuvo para el período inicial de cultivo una tasa promedio de demanda de agua de la cuenca del río Claro de  $25,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , siendo el grupo de los Cítricos (Limonero, Naranja, Pomelo y Mandarinas) el que presenta los mayores requerimientos dentro de los frutales, con  $44,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ .

**Cuadro 5.3.** Demanda hídrica para el período inicial y de máxima demanda.

| Demanda Hídrica                                               |              | Período Inicial de Cultivo (Sept-Oct)                 |                                             |                | Período de Máxima Demanda (Dic-Ene)                  |                                            |                |
|---------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| Tipo de Cultivo                                               | Área (ha)    | Demanda Inicial ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{día}$ ) | Volumen Inicial ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) | Porcentaje (%) | Demanda Máxima ( $\text{m}^3/\text{ha}/\text{día}$ ) | Volumen Máximo ( $\text{m}^3/\text{día}$ ) | Porcentaje (%) |
| Almendro                                                      | 657.2        | 22.5                                                  | 14767.2                                     | 2.3%           | 105.4                                                | 69293.3                                    | 2.0%           |
| Arándano                                                      | 127.3        | 16.9                                                  | 2145.1                                      | 0.3%           | 105.4                                                | 13420.6                                    | 0.4%           |
| Cerezo                                                        | 1047.7       | 28.1                                                  | 29427.7                                     | 4.6%           | 140.6                                                | 147291.6                                   | 4.1%           |
| Ciruelo                                                       | 1805.2       | 28.1                                                  | 50703.1                                     | 7.9%           | 134.7                                                | 243204.7                                   | 6.8%           |
| Cítricos                                                      | 196.5        | 44.9                                                  | 8831.6                                      | 1.4%           | 93.7                                                 | 18418.3                                    | 0.5%           |
| Durazno                                                       | 2400.7       | 28.1                                                  | 67431.7                                     | 10.5%          | 134.7                                                | 323446.1                                   | 9.1%           |
| Kiwi                                                          | 660.7        | 22.5                                                  | 14846.4                                     | 2.3%           | 123.0                                                | 81275.9                                    | 2.3%           |
| Manzano                                                       | 1831.2       | 28.1                                                  | 51434.0                                     | 8.0%           | 140.6                                                | 257437.2                                   | 7.2%           |
| Nogal                                                         | 901.7        | 28.1                                                  | 25326.6                                     | 3.9%           | 128.9                                                | 116201.1                                   | 3.3%           |
| Peral                                                         | 629.3        | 28.1                                                  | 17676.0                                     | 2.8%           | 140.6                                                | 88471.7                                    | 2.5%           |
| Uva de mesa                                                   | 1713.2       | 16.9                                                  | 28872.2                                     | 4.5%           | 99.6                                                 | 170603.7                                   | 4.8%           |
| Maíz                                                          | 6758.0       | 20.6                                                  | 139388.7                                    | 21.7%          | 172.0                                                | 1162270.0                                  | 32.7%          |
| Alfalfa                                                       | 1848.4       | 27.5                                                  | 50833.2                                     | 7.9%           | 172.0                                                | 317898.5                                   | 8.9%           |
| Trigo                                                         | 26.3         | 0.0                                                   | 0.0                                         | 0.0%           | 0.0                                                  | 0.0                                        | 0.0%           |
| Viña                                                          | 2623.5       | 20.6                                                  | 54111.9                                     | 8.4%           | 85.3                                                 | 223785.2                                   | 6.3%           |
| Hortaliza                                                     | 2089.1       | 41.3                                                  | 86178.0                                     | 13.4%          | 152.9                                                | 319369.3                                   | 9.0%           |
| Suelo desnudo                                                 | 5085.7       | 0.0                                                   | 0.0                                         | 0.0%           | 0.0                                                  | 0.0                                        | 0.0%           |
| No cultivo                                                    | 12018.0      | 0.0                                                   | 0.0                                         | 0.0%           | 0.0                                                  | 0.0                                        | 0.0%           |
| <b>TOTAL</b>                                                  | <b>42420</b> |                                                       | <b>641973.5</b>                             |                |                                                      | <b>3552387.2</b>                           |                |
| <b>Caudal equivalente* (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b> |              |                                                       | <b>7.4</b>                                  |                |                                                      | <b>41.1</b>                                |                |

\* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de  $\text{m}^3/\text{s}$ . No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

Es esperable que los Cítricos tengan una tasa de demanda mayor a los demás cultivos en el período inicial, debido a que presenta un ciclo perenne, el cual provoca que tenga hojas activas durante toda la temporada y, por lo tanto, una demanda evapotranspirativa continua durante el año.

Por otra parte, los cultivos que presentan una menor tasa de demanda hídrica para el período inicial son la Uva de mesa y los Arándanos. La Uva de mesa en el período inicial, recién está comenzando a brotar, por lo que el área foliar es baja, lo que genera que transpire poco y tenga una demanda baja en este período. En tanto, los Arándanos, al ser un cultivo que no se adapta completamente a las condiciones edafoclimáticas de la zona, no comienzan con un crecimiento de forma temprana.

Por otra parte, al ponderar la tasa de demanda hídrica de cada cultivo por la superficie que éste ocupa, se obtiene el volumen de agua diario que necesita la cuenca para satisfacer los requerimientos hídricos de las plantaciones agrícolas. En este sentido, el cultivo que se observó con mayor volumen de agua demandada es el Maíz, con 21,7% del total de demanda hídrica diaria requerida en la cuenca. Siendo el Maíz el cultivo con mayor superficie en la cuenca (28,6% del área cultivable), es esperable que presente el mayor volumen de agua requerido en la cuenca; sin embargo, también juega un rol importante el método de riego mayoritariamente utilizado para este cultivo (riego por surco), el cual requiere agregar un 55% más de agua para satisfacer las necesidades hídricas, para equiparar las pérdidas propias de este tipo de riego. Lo anterior, también se observó comparando el cultivo del Duraznero y el grupo Hortalizas, que a pesar que el primero presenta una superficie mayor (311 ha de diferencia), las hortalizas demandan un 2,9% más de agua, debido principalmente a que son regadas con métodos menos eficientes.

A pesar que los Cítricos presentan la mayor tasa de demanda hídrica, la superficie cultivada en la cuenca es baja, por lo tanto, el volumen de agua total requerido para satisfacer su demanda es bajo y sólo representan un 1,4% del total de la cuenca.

Analizando los frutales de hoja caduca en la cuenca de estudio, se observó que la especie que registra un mayor volumen de demanda hídrica en el período inicial es el Duraznero, debido principalmente a que presenta la mayor superficie plantada en esta cuenca (2.400 ha). Por otra parte, el cultivo con menor superficie y, por ende, el que tiene menor demanda hídrica es el Arándano (127 ha). Los frutales de la cuenca demandaron en total 311.461 m<sup>3</sup> al día en el período inicial de la temporada agrícola, que corresponde un 48,5% del total de la demanda.

Analizando el período de máxima demanda hídrica en la cuenca del río Claro, se obtuvo que en promedio los cultivos aumentaron en un 78,5% sus requerimientos de agua, debido principalmente a la mayor demanda evapotranspirativa de la atmósfera y también al aumento del área foliar de las plantas. El Maíz, al ser un cultivo muy exigente en insumos agrícolas (fertilización, agua, etc), ya que presenta un crecimiento exponencial, requiere una gran cantidad de agua en el período de máxima demanda (172 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup>dia<sup>-1</sup>), por lo que es el cultivo que registró un mayor aumento, tanto en su tasa de demanda hídrica, como en el volumen total de agua requerido, observándose que demandó un 88% más de agua con respecto al período inicial. Cabe destacar, que en el período de máxima demanda hídrica, el Maíz representó un 32,7% del total de agua requerida en la cuenca.

El cultivo que presentó un menor aumento en su volumen de agua requerido es el grupo de los Cítricos (52% más de agua requerida), lo que se explica por su demanda continua durante la temporada.

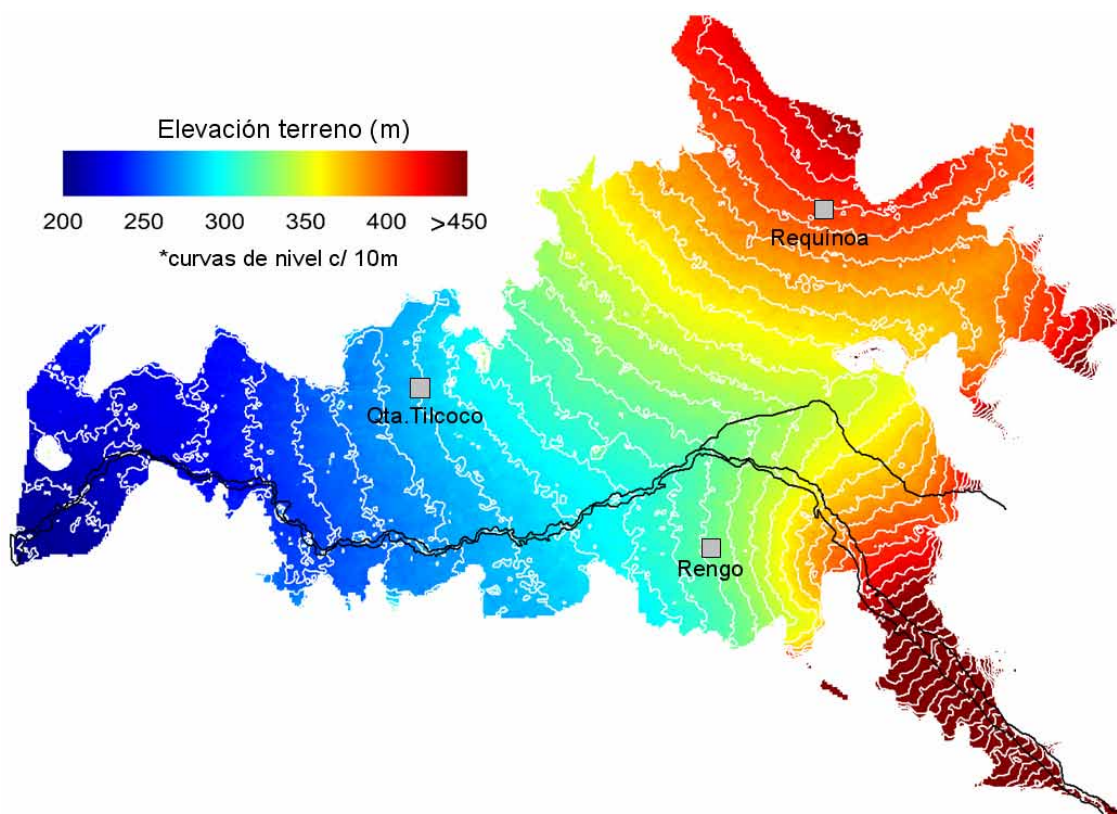
Comparando las tasas de demanda hídrica entre los frutales (incluyendo las viñas) y los demás cultivos (Maíz, Alfalfa y Hortalizas), en el período de máxima demanda, se observó que en promedio los frutales demandan  $46,2 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$  menos de agua, lo que puede ser explicado por la mayor superficie de riegos menos eficientes en el rubro de cultivos no frutales. En total, los cultivos no frutales, demandaron  $1.799.537 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ , lo que corresponde al 50,6% del volumen total requerido en la cuenca.

Cabe señalar que los resultados de demanda hídrica obtenidos, al compararlos con otros estudios oficiales, que están realizados en base a una unidad espacial mayor (subcuenca o cuenca), no permitió compararlos con los resultados del presente estudio, ya que la información no está desagregada para las subcuencas ni para las secciones de riego que se han considerado en este estudio de caso. Por ejemplo, el estudio con resultados oficiales más actualizados corresponde a la Estimación de demanda de agua y proyecciones futuras, Zona II, Regiones V a XII y Región Metropolitana, S.I.T. N° 123 (DGA, 2007), que contiene resultados agregados a nivel de la cuenca del río Cachapoal, lo cual no es comparable con los resultados obtenidos para la cuenca del río Claro de Rengo. Por otra parte, el estudio Análisis de la oferta y demanda de recursos hídricos en cuencas críticas de Loa, Rapel y Mataquito, Volumen II: Cuenca del río Rapel, S.I.T. N° 31 (DGA, 1996), contiene información de demanda hídrica para las secciones de riego 1 y 2 del río Claro de Rengo y sección 1, 2 y 3 del río Cachapoal; sin embargo, en este caso, la información tampoco se presenta desagregada para la sección 1, ribera sur del río Cachapoal, lo cual no permitiría realizar directamente una comparación con los resultados del presente estudio.

Con lo anterior, se concluye que las imágenes permitieron realizar el estudio de las demandas hídricas a una escala de mayor y mejor resolución y, que cuando se requiera, se podría efectuar la actualización de la información levantada, lo cual resuelve de mejor forma la obtención de información espacial y temporal para el apoyo de la toma de decisiones de la CNR.

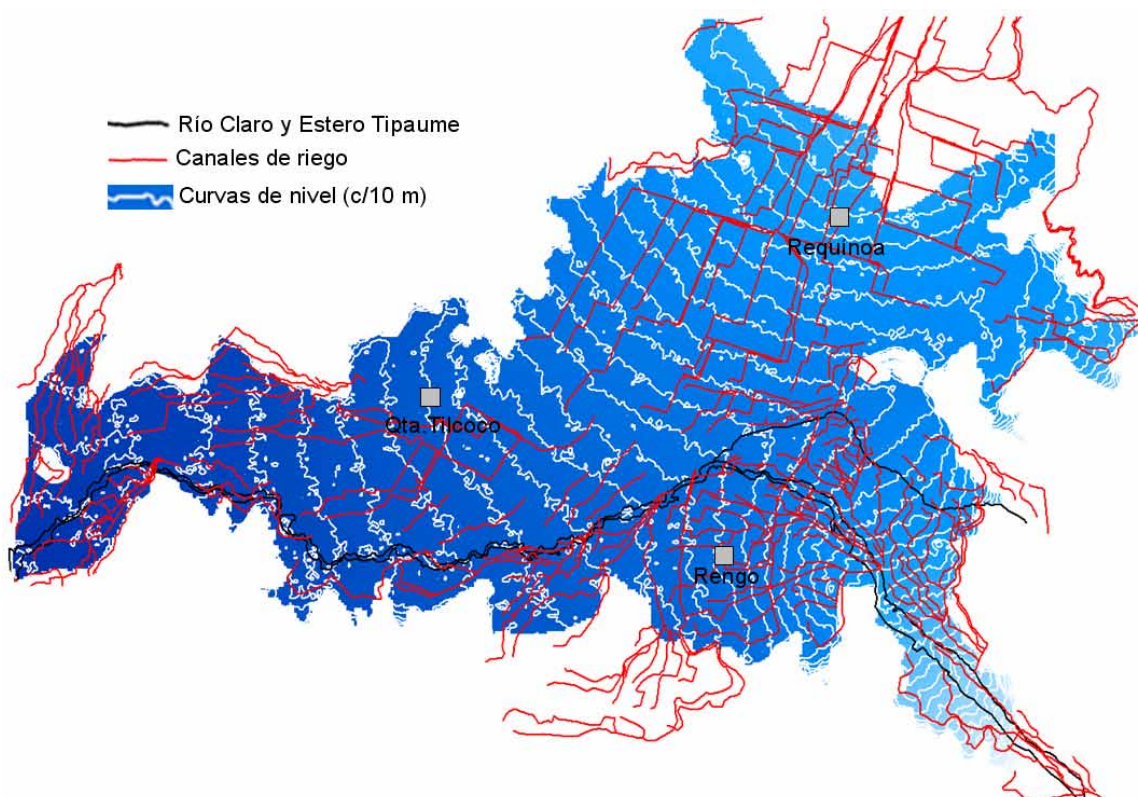
### **5.6.2 Estimación de demanda hídrica por sección de riego**

La cuenca hidrográfica del río Claro de Rengo presenta una topografía con un gradiente de pendientes de norte-este a sur-oeste en el tramo de Requínoa a Quinta de Tilcoco, y una pendiente de este a oeste a lo largo del río Claro. La hidrografía natural muestra que el río Claro drena las aguas de la cuenca, sin embargo, gran parte de la cuenca en el sector norte no presenta escurrimientos de agua importantes. En la **Figura 5.16**, se muestra la topografía en la cuenca hidrográfica del Río Claro, con el trazado de las curvas de nivel que representan curvas equipotenciales de energía, las que determinan el patrón general de flujo del agua.



**Figura 5.16.** Topografía en la cuenca hidrográfica del río Claro. Base DEM SRTM (NASA, 2000).

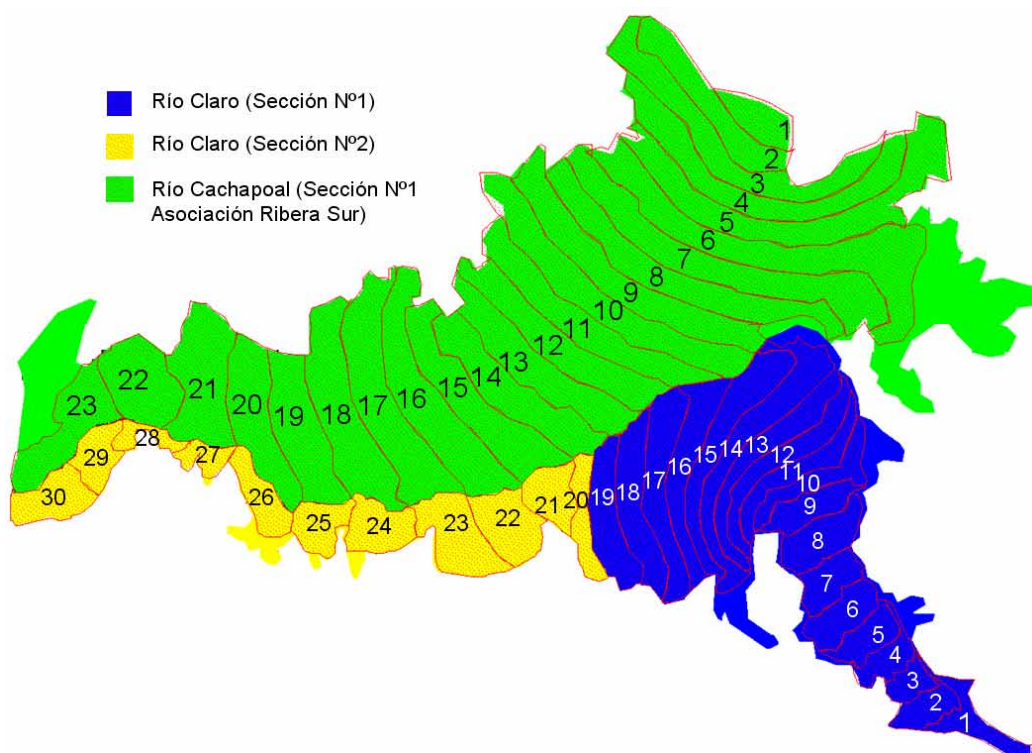
El sistema de irrigación de canales en la cuenca del río Claro indica que gran parte del abastecimiento de agua proviene desde fuera de los límites de la cuenca hidrográfica natural, principalmente desde los canales de la sección N°1 del río Cachapoal administrada por la Asociación de Canalistas de la Ribera Sur. En el río Claro el abastecimiento de agua para riego, proviene directamente del cauce donde destacan las bocatomas en el sector puente la Chimba, desde donde se riega gran parte de la sección N°1 del río Claro. En la **Figura 5.17** se muestra la red de canales de riego en la cuenca hidrográfica del río Claro.



**Figura 5.17.** Red de canales de riego en la cuenca hidrográfica del río Claro.

Las secciones de riego que abarca el área de estudio son tres (ver **Figura 5.18**): Sección N°1 del río Cachapoal ribera sur (área verde), y sección N°1 y N°2 del río Claro (área azul y amarilla, respectivamente). La 1<sup>era</sup> Sección del río Cachapoal comprende desde el nacimiento del río hasta la Punta de Cortés. La Sección 1 del río Claro, comprende desde el embalse Los Cristales hasta el puente La Chimba (475 Km<sup>2</sup>). En tanto que la 2<sup>da</sup> Sección del río Claro abarca desde el puente La Chimba hasta la confluencia del río con el río Cachapoal (506 Km<sup>2</sup>).

Con el objetivo de efectuar un análisis espacial de mayor detalle, se realizó una división de las secciones de riego en sub-secciones que se ordenan según el gradiente de curvas de nivel (líneas equipotenciales) de la cuenca. La información analizada por sub-secciones permite observar la distribución espacial de los cultivos en la dirección del flujo de agua, como también efectuar una estimación de demanda hídrica por sección de riego. En la **Figura 5.18** se puede observar la distribución de las divisiones de cada sección de riego: En la sección N°1 del río Cachapoal se definieron 23 subsecciones, en tanto que en la sección N°1 y N°2 del río Claro se definieron 30 sub-secciones.



**Figura 5.18.** Distribución espacial de las secciones de riego en la cuenca del río Claro.

#### 5.6.2.1 Sección N°1 del río Cachapoal

Para conocer la distribución y la superficie relativa de los distintos rubros agrícolas observados en la Sección 1 del río Cachapoal, se agruparon ciertos cultivos similares. Se agrupó los cultivos frutales (Frutales), el Maíz, Trigo y Alfalfa (Grupo Cereales+Forrajas), Grupo Hortalizas y la Vid vinífera.

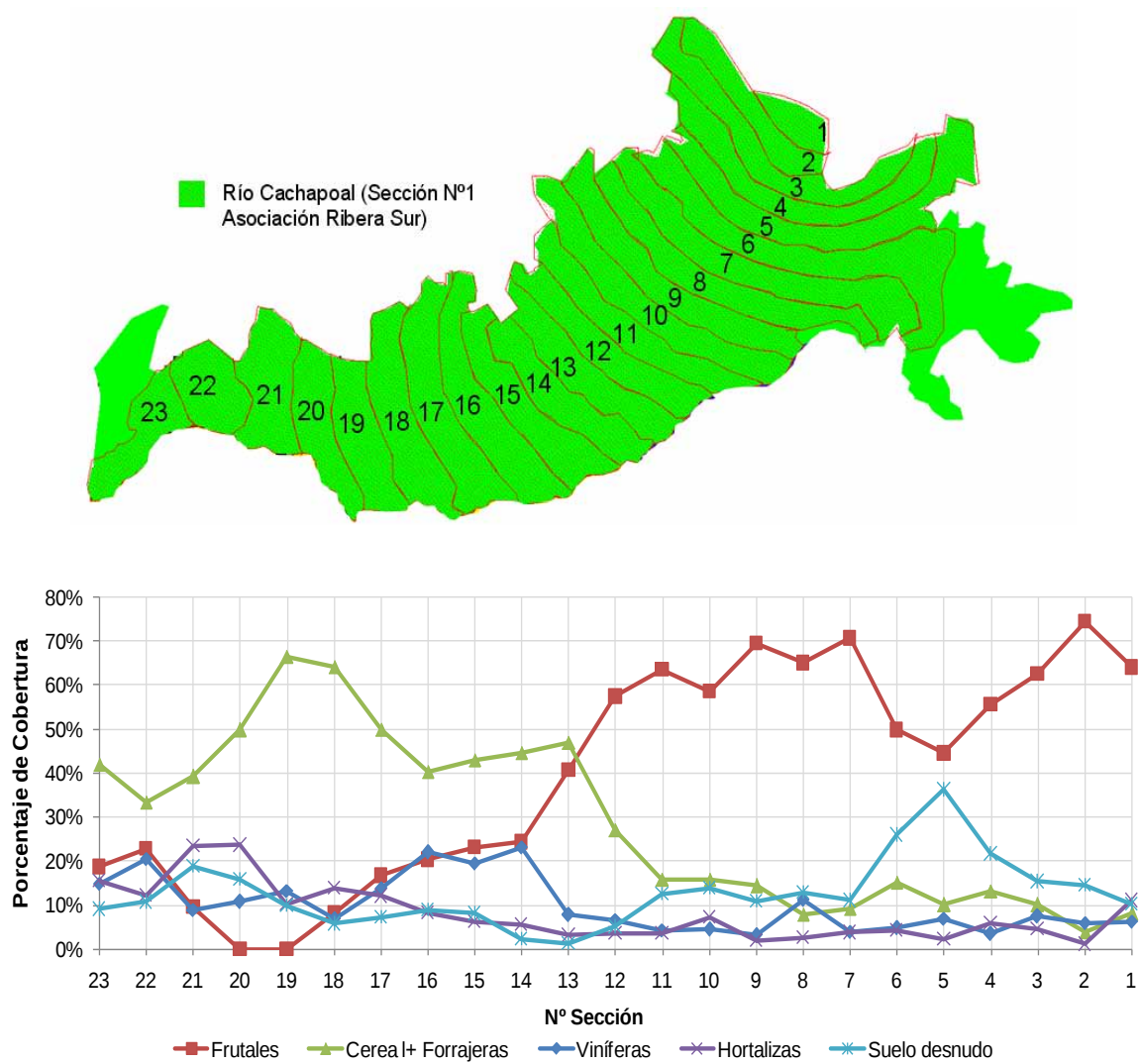
Como se observa en la **Figura 5.19**, existe una clara distribución de los cultivos en la sección de riego. En las primeras divisiones realizadas (1 a 13), que corresponden a las comunas de Requinoa y Rengo, se observó una dominancia de cultivos frutales con un promedio de 65% del uso del suelo, en desmedro del cultivo principal de la zona de estudio Maíz (Grupo Cereales+Forrajas).

Se observó un punto de inflexión en la división 13 en donde se igualan los rubros de cultivos frutales y Cereales+Forrajas. En este lugar se observó en terreno un cambio notorio en el suelo (**Anexo N°6**) que restringe la producción de frutales. Las particularidades del suelo que provocan una disminución de la superficie de los frutales son las que tienen relación con la profundidad del nivel freático y la dominancia de texturas finas (suelos arcillosos), condición que favorece a su vez, a cultivos hortícolas y el Maíz.

En las últimas divisiones de la sección 1 del río Cachapoal, comuna de Quinta Tilcoco y San Vicente, se observó una disminución relativa del grupo Cereales+Forrajas, debido principalmente a la atomización de los cultivos en estas zonas y el aumento de Grupo Hortalizas. Además, de acuerdo a lo observado en terreno, el tamaño de los predios en esta zona es bastante menor a los vistos en otras comunas.

En base a la clasificación de cultivos efectuada, se estimó la demanda hídrica por cada sección de riego. En el caso de la sección N°1 del río Cachapoal Ribera Sur, se obtuvo una demanda equivalente a 5,3 m<sup>3</sup>/s en el período inicial y 29,1 m<sup>3</sup>/s en el período de demanda máxima, según se muestra en el **Cuadro 5.4**. Cabe señalar que este caudal equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m<sup>3</sup>/s y no considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

Estos resultados muestran que los tipos de cultivos que mayor agua requieren son los frutales y el maíz, con una demanda hídrica que representa el 49,2% y 21,2% en el período inicial, y 44,1% y 32,1% en el período de máxima demanda hídrica, respectivamente.



**Figura 5.19.** Distribución de grupos de cultivos por división Sección N°1 río Cachapoal.

**Cuadro 5.4.** Demanda hídrica para el período inicial y de máxima demanda, en la Sección N°1 río Cachapoal Ribera Sur.

| Demanda Hídrica                                  |                | Período Inicial de Cultivo<br>(Sept-Oct)    |                                          |                   | Período de Máxima Demanda<br>(Dic-Ene)     |                                         |                   |
|--------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| Tipo de Cultivo                                  | Área<br>(ha)   | Demanda Inicial<br>(m <sup>3</sup> /ha/día) | Volumen Inicial<br>(m <sup>3</sup> /día) | Porcentaje<br>(%) | Demanda Máxima<br>(m <sup>3</sup> /ha/día) | Volumen Máximo<br>(m <sup>3</sup> /día) | Porcentaje<br>(%) |
| Almendro                                         | 243.0          | 22.5                                        | 5460.6                                   | 1.2%              | 105.4                                      | 25623.1                                 | 1.0%              |
| Arándano                                         | 52.0           | 16.9                                        | 875.9                                    | 0.2%              | 105.4                                      | 5480.1                                  | 0.2%              |
| Cerezo                                           | 811.3          | 28.1                                        | 22787.0                                  | 5.0%              | 140.6                                      | 114053.2                                | 4.5%              |
| Ciruelo                                          | 1367.8         | 28.1                                        | 38417.2                                  | 8.4%              | 134.7                                      | 184274.0                                | 7.3%              |
| Cítricos                                         | 113.6          | 44.9                                        | 5107.2                                   | 1.1%              | 93.7                                       | 10651.2                                 | 0.4%              |
| Durazno                                          | 1431.4         | 28.1                                        | 40204.8                                  | 8.8%              | 134.7                                      | 192848.2                                | 7.7%              |
| Kiwi                                             | 513.2          | 22.5                                        | 11532.6                                  | 2.5%              | 123.0                                      | 63134.8                                 | 2.5%              |
| Manzano                                          | 1246.4         | 28.1                                        | 35008.8                                  | 7.7%              | 140.6                                      | 175225.9                                | 7.0%              |
| Nogal                                            | 863.1          | 28.1                                        | 24241.4                                  | 5.3%              | 128.9                                      | 111222.0                                | 4.4%              |
| Peral                                            | 534.7          | 28.1                                        | 15019.6                                  | 3.3%              | 140.6                                      | 75176.2                                 | 3.0%              |
| Uva de mesa                                      | 1505.4         | 16.9                                        | 25370.0                                  | 5.6%              | 99.6                                       | 149909.3                                | 6.0%              |
| Maíz                                             | 4684.4         | 20.6                                        | 96618.9                                  | 21.2%             | 172.0                                      | 805641.1                                | 32.1%             |
| Alfalfa                                          | 1163.2         | 27.5                                        | 31988.4                                  | 7.0%              | 172.0                                      | 200047.3                                | 8.0%              |
| Trigo                                            | 26.3           | 0.0                                         | 0.0                                      | 0.0%              | 0.0                                        | 0.0                                     | 0.0%              |
| Viña                                             | 1999.4         | 20.6                                        | 41238.4                                  | 9.1%              | 85.3                                       | 170545.4                                | 6.8%              |
| Hortaliza                                        | 1497.3         | 41.3                                        | 61765.7                                  | 13.6%             | 152.9                                      | 228899.3                                | 9.1%              |
| Suelo desnudo                                    | 3344.1         | 0.0                                         | 0.0                                      | 0.0%              | 0.0                                        | 0.0                                     | 0.0%              |
| <b>TOTAL</b>                                     | <b>21396.5</b> |                                             | <b>455636.7</b>                          |                   |                                            | <b>2512731.1</b>                        |                   |
| <b>Caudal equivalente*<br/>(m<sup>3</sup>/s)</b> |                |                                             | <b>5.3</b>                               |                   |                                            | <b>29.1</b>                             |                   |

\* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m<sup>3</sup>/s. No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

#### 5.6.2.2 Sección N°1 y N°2 del río Claro de Rengo

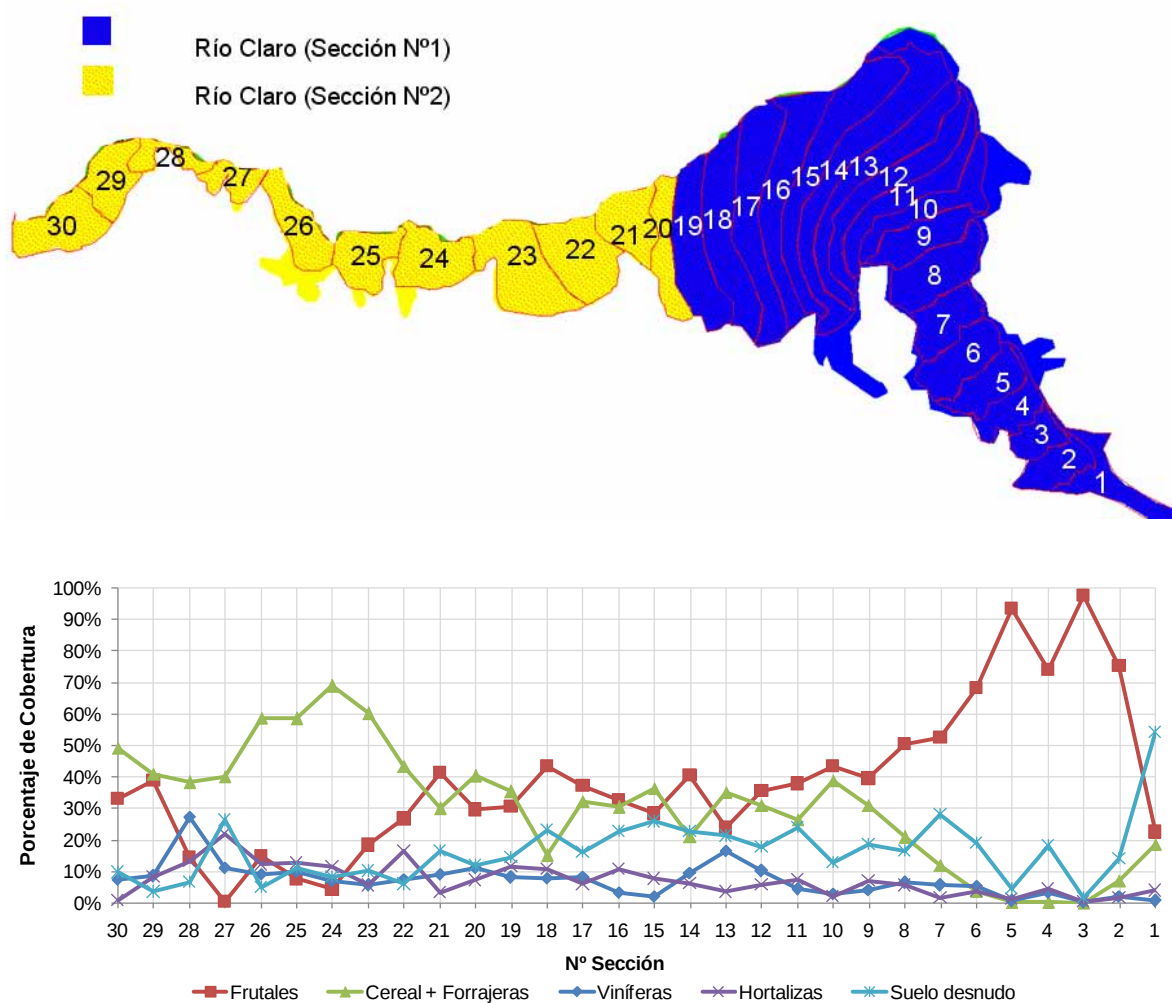
Para las secciones de riego del río Claro (ver **Figura 5.20**), se observó una distribución similar a la sección correspondiente al río Cachapoal. Es destacable, la clara dominancia del grupo frutales en las primeras divisiones (1 a 5) en donde la cobertura frutal es en promedio del 90%, lo que se explica por las condiciones de pendientes observadas en esta zona, que impide el desarrollo ideal de cultivos hortícolas y cereales.

A diferencia de la sección del río Cachapoal anteriormente analizada, se observó una homogeneidad en el uso del suelo entre las divisiones 9 a la 21. En esta zona se dan las condiciones propicias para el establecimiento de todos los rubros agrícolas observados en el área de estudio.

Nuevamente, se observó una dominancia del grupo Cereales+Forrajeras en las últimas divisiones de la sección del río Claro, debido a las condiciones edáficas que favorecen el cultivo de especies adaptadas a suelos pesados (arcillosos) y con alto contenido de humedad.

También en base a la clasificación de cultivos efectuada, se estimó la demanda hídrica por cada sección de riego en el río Claro de Rengo. En el caso de la sección N°1, se obtuvo una demanda hídrica equivalente a 1,5 m<sup>3</sup>/s en el período inicial y 8,3 m<sup>3</sup>/s en el período de demanda máxima, según se muestra en el **Cuadro 5.5**. Estos resultados muestran que los tipos de cultivos que mayor agua requieren son los frutales y el maíz, con una demanda hídrica que representa el 54,4% y 18,3% en el período inicial y 48,9% y 28,0% en el período de máxima demanda, respectivamente.

En el caso de la sección N°2, se obtuvo una demanda equivalente a 0,6 m<sup>3</sup>/s en el período inicial y 3,7 m<sup>3</sup>/s en el período de demanda hídrica máxima, según se muestra en el **Cuadro 5.6**. Estos resultados muestran que los tipos de cultivos que mayor agua requieren son el maíz y los frutales, con una demanda hídrica que representa el 34,2% y 28,7% en el período inicial y 48,6% y 21,6% en el período de máxima demanda, respectivamente



**Figura 5.20.** Distribución de grupos de cultivos por división Sección N°1 y N°2 río Claro.

**Cuadro 5.5.** Demanda hídrica para el período inicial y de máxima demanda, en la Sección N°1 del río Claro de Rengo.

| Demanda Hídrica                              |               | Período Inicial de Cultivo<br>(Sept-Oct)    |                                          |                   | Período de Máxima Demanda<br>(Dic-Ene)     |                                         |                   |
|----------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| Tipo de Cultivo                              | Área<br>(ha)  | Demanda Inicial<br>(m <sup>3</sup> /ha/día) | Volumen Inicial<br>(m <sup>3</sup> /día) | Porcentaje<br>(%) | Demanda Máxima<br>(m <sup>3</sup> /ha/día) | Volumen Máximo<br>(m <sup>3</sup> /día) | Porcentaje<br>(%) |
| Almendro                                     | 411.0         | 22.5                                        | 9235.9                                   | 7.0%              | 105.4                                      | 43338.2                                 | 6.0%              |
| Arándano                                     | 70.9          | 16.9                                        | 1195.5                                   | 0.9%              | 105.4                                      | 7479.6                                  | 1.0%              |
| Cerezo                                       | 208.2         | 28.1                                        | 5848.4                                   | 4.4%              | 140.6                                      | 29272.2                                 | 4.1%              |
| Ciruelo                                      | 347.5         | 28.1                                        | 9760.7                                   | 7.4%              | 134.7                                      | 46818.7                                 | 6.5%              |
| Cítricos                                     | 6.7           | 44.9                                        | 301.4                                    | 0.2%              | 93.7                                       | 628.6                                   | 0.1%              |
| Durazno                                      | 896.8         | 28.1                                        | 25188.9                                  | 19.1%             | 134.7                                      | 120822.5                                | 16.7%             |
| Kiwi                                         | 100.7         | 22.5                                        | 2262.1                                   | 1.7%              | 123.0                                      | 12383.8                                 | 1.7%              |
| Manzano                                      | 476.4         | 28.1                                        | 13381.1                                  | 10.1%             | 140.6                                      | 66975.1                                 | 9.3%              |
| Nogal                                        | 27.7          | 28.1                                        | 776.9                                    | 0.6%              | 128.9                                      | 3564.6                                  | 0.5%              |
| Peral                                        | 79.8          | 28.1                                        | 2241.3                                   | 1.7%              | 140.6                                      | 11218.0                                 | 1.6%              |
| Uva de mesa                                  | 102.2         | 16.9                                        | 1721.5                                   | 1.3%              | 99.6                                       | 10172.2                                 | 1.4%              |
| Maíz                                         | 1174.6        | 20.6                                        | 24227.6                                  | 18.3%             | 172.0                                      | 202017.6                                | 28.0%             |
| Alfalfa                                      | 417.7         | 27.5                                        | 11486.9                                  | 8.7%              | 172.0                                      | 71836.3                                 | 10.0%             |
| Trigo                                        | 0.0           | 0.0                                         | 0.0                                      | 0.0%              | 0.0                                        | 0.0                                     | 0.0%              |
| Viña                                         | 427.5         | 20.6                                        | 8816.9                                   | 6.7%              | 85.3                                       | 36463.1                                 | 5.1%              |
| Hortaliza                                    | 381.7         | 41.3                                        | 15746.4                                  | 11.9%             | 152.9                                      | 58354.9                                 | 8.1%              |
| Suelo desnudo                                | 1447.1        | 0.0                                         | 0.0                                      | 0.0%              | 0.0                                        | 0.0                                     | 0.0%              |
|                                              |               |                                             |                                          |                   |                                            |                                         |                   |
| <b>TOTAL</b>                                 | <b>6576.5</b> |                                             | <b>132191.4</b>                          |                   |                                            | <b>721345.3</b>                         |                   |
| <b>Caudal equivalente* (m<sup>3</sup>/s)</b> |               |                                             | <b>1.5</b>                               |                   |                                            | <b>8.3</b>                              |                   |

\* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m<sup>3</sup>/s. No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

**Cuadro 5.6.** Demanda hídrica para el período inicial y de máxima demanda, en la Sección N°2 del río Claro de Rengo.

| Demanda Hídrica                              |               | Período Inicial de Cultivo<br>(Sept-Oct)    |                                          |                   | Período de Máxima Demanda<br>(Dic-Ene)     |                                         |                   |
|----------------------------------------------|---------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| Tipo de Cultivo                              | Área<br>(ha)  | Demanda Inicial<br>(m <sup>3</sup> /ha/día) | Volumen Inicial<br>(m <sup>3</sup> /día) | Porcentaje<br>(%) | Demanda Máxima<br>(m <sup>3</sup> /ha/día) | Volumen Máximo<br>(m <sup>3</sup> /día) | Porcentaje<br>(%) |
| Almendro                                     | 3.1           | 22.5                                        | 70.8                                     | 0.1%              | 105.4                                      | 332.0                                   | 0.1%              |
| Arándano                                     | 4.4           | 16.9                                        | 73.7                                     | 0.1%              | 105.4                                      | 460.9                                   | 0.1%              |
| Cerezo                                       | 28.2          | 28.1                                        | 792.4                                    | 1.5%              | 140.6                                      | 3966.1                                  | 1.2%              |
| Ciruelo                                      | 89.9          | 28.1                                        | 2525.1                                   | 4.7%              | 134.7                                      | 12112.1                                 | 3.8%              |
| Cítricos                                     | 76.2          | 44.9                                        | 3423.0                                   | 6.3%              | 93.7                                       | 7138.6                                  | 2.2%              |
| Durazno                                      | 72.6          | 28.1                                        | 2038.0                                   | 3.8%              | 134.7                                      | 9775.4                                  | 3.1%              |
| Kiwi                                         | 46.8          | 22.5                                        | 1051.7                                   | 1.9%              | 123.0                                      | 5757.3                                  | 1.8%              |
| Manzano                                      | 108.4         | 28.1                                        | 3044.1                                   | 5.6%              | 140.6                                      | 15236.3                                 | 4.8%              |
| Nogal                                        | 11.0          | 28.1                                        | 308.3                                    | 0.6%              | 128.9                                      | 1414.5                                  | 0.4%              |
| Peral                                        | 14.8          | 28.1                                        | 415.1                                    | 0.8%              | 140.6                                      | 2077.5                                  | 0.7%              |
| Uva de mesa                                  | 105.7         | 16.9                                        | 1780.7                                   | 3.3%              | 99.6                                       | 10522.1                                 | 3.3%              |
| Maíz                                         | 899.0         | 20.6                                        | 18542.2                                  | 34.2%             | 172.0                                      | 154611.4                                | 48.6%             |
| Alfalfa                                      | 267.6         | 27.5                                        | 7358.0                                   | 13.6%             | 172.0                                      | 46014.9                                 | 14.5%             |
| Trigo                                        | 0.0           | 0.0                                         | 0.0                                      | 0.0%              | 0.0                                        | 0.0                                     | 0.0%              |
| Viña                                         | 196.7         | 20.6                                        | 4056.7                                   | 7.5%              | 85.3                                       | 16776.7                                 | 5.3%              |
| Hortaliza                                    | 210.1         | 41.3                                        | 8665.9                                   | 16.0%             | 152.9                                      | 32115.1                                 | 10.1%             |
| Suelo desnudo                                | 294.5         | 0.0                                         | 0.0                                      | 0.0%              | 0.0                                        | 0.0                                     | 0.0%              |
|                                              |               |                                             |                                          |                   |                                            |                                         |                   |
| <b>TOTAL</b>                                 | <b>2428.8</b> |                                             | <b>54145.4</b>                           |                   |                                            | <b>318310.7</b>                         |                   |
| <b>Caudal equivalente* (m<sup>3</sup>/s)</b> |               |                                             | <b>0.6</b>                               |                   |                                            | <b>3.7</b>                              |                   |

\* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m<sup>3</sup>/s. No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

### 5.6.3 Índices vegetacionales

Para estudiar la cobertura vegetal se utilizan índices vegetacionales que permiten discriminar ciertas propiedades de la vegetación aislándola de otros elementos de la superficie de la Tierra como el suelo y el agua y, además, permiten resaltar alguna propiedad específica de la vegetación. De esta forma, la información contenida en las firmas hiperespectrales permitió aplicar una herramienta de índices vegetacionales para estimar la distribución del estrés agrícola en la cuenca de estudio.

El índice de estrés agrícola indica, comparativamente, las zonas en donde se concentra una mayor eficiencia en el crecimiento. Es así, que un cultivo seco o en vías a secarse, indica un mayor valor de estrés agrícola en comparación con un cultivo sano, verde, que presenta un valor bajo de este índice.

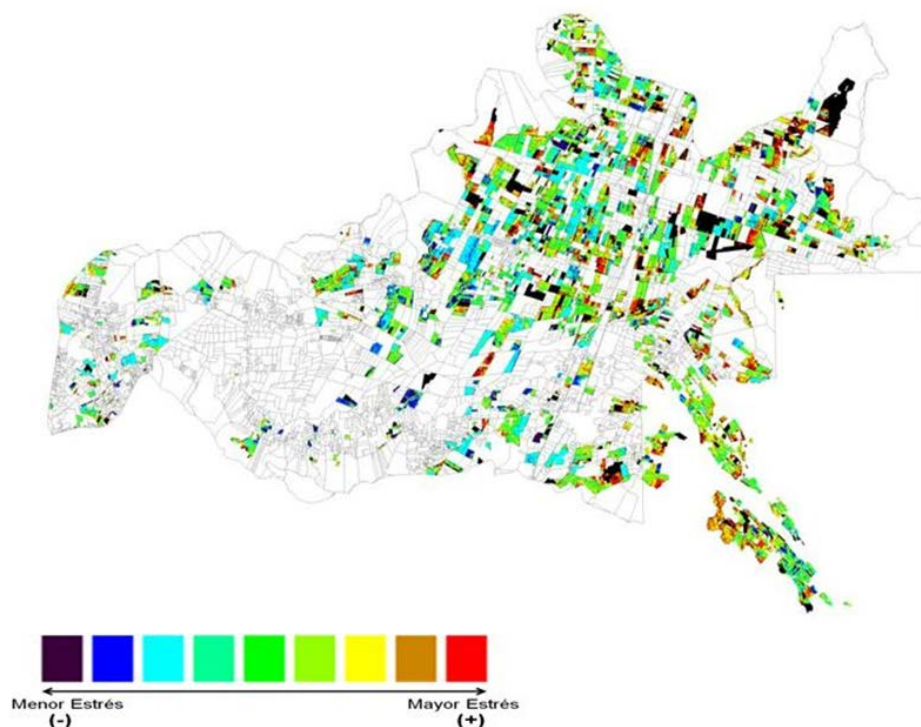
El índice de estrés agrícola se basa en el cálculo de los siguientes índices vegetacionales:

- Propiedades de verdor mediante la evaluación del índice NDVI.
- Contenido de agua en canopia del índice WBI.
- Eficiencia del uso de la luz mediante el índice PRI de reflectancia fotoquímica.

El resultado de esta herramienta se muestra en el **Plano N°8**, donde se observan predios bien marcados con bajo estrés agrícola, asociados principalmente a cultivos con alto vigor (Maíz y Uva de mesa). En cambio, los cultivos que presentan un mayor estrés agrícola son la Vid-vinífera y algunos frutales.

Es esperable que el Maíz sea el cultivo que presente un menor estrés agrícola (colores fríos), debido a su ecofisiología, ya que es un cultivo C4, que se caracteriza por una mayor eficiencia en la fotosíntesis, y que por lo tanto, en buenas condiciones de producción, siempre debiese presentar un alto vigor y una mejor eficiencia en el uso de la luz. Caso contrario se observa en la Vid-vinífera (colores cálidos), que es un cultivo que para elaborar un vino de calidad, se debe restringir su vigor y por ende su producción, a través de manejos culturales, como riegos controlados. De este modo, los cultivos de Vid-vinífera presentan valores altos de estrés agrícola.

Para determinar la distribución del índice estrés agrícola de los sectores cultivados con frutales, se efectuó una división del **Plano N° 8** generando la **Figura 5.21**.



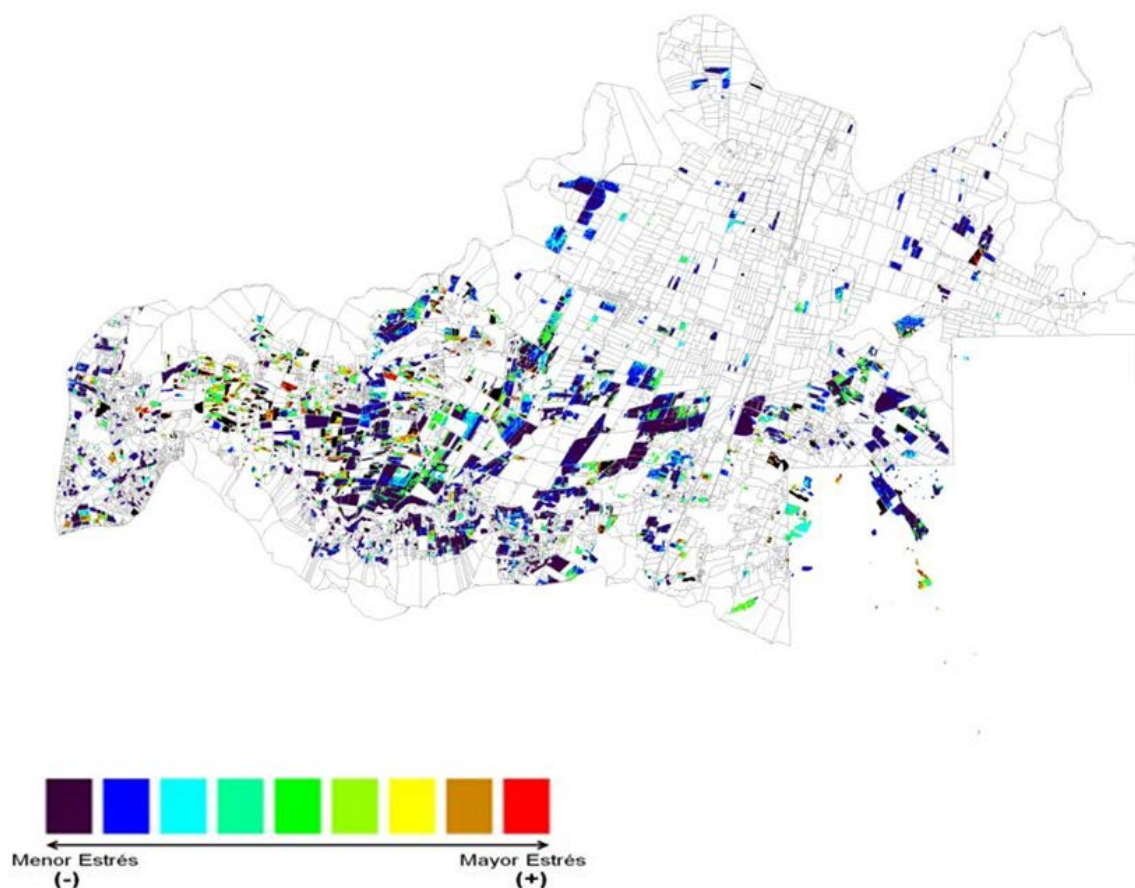
**Figura 5.21.** Índice vegetacional estrés agrícola para frutales (excluye vid-vinífera).

Como se observa en la **Figura 5.21**, el índice de estrés agrícola para el caso de los frutales se manifiesta con una dominancia de colores verdes y cálidos, lo que se interpreta como niveles de medios a altos de estrés agrícola.

Tal como se mencionó anteriormente, la Uva de mesa es el cultivo frutal que presenta un menor índice de estrés agrícola (cultivo más vigoroso y sano), expresado en colores cian y azules.

Los valores altos de estrés agrícola se asocian a cultivos frutales que o presentan espaciamientos entre hileras considerables, o bien, pueden ser frutales en formación, por lo tanto, son cultivos considerados poco vigorosos o con alto estrés agrícola.

Por otra parte, como el Maíz es el cultivo más importante en la zona de estudio, se realizó un análisis del índice de estrés agrícola exclusivamente para este cultivo (**Figura 5.22**).



**Figura 5.22.** Índice vegetacional estrés agrícola para el cultivo del Maíz.

En la **Figura 5.22** se observa que el cultivo del Maíz presentó los valores más bajos de estrés agrícola, denotado por colores fríos como el azul y el cian, lo que indica que en la zona de estudio, tanto el clima como las condiciones de suelo permiten el desarrollo óptimo del cultivo.

En general, el cultivo del maíz presentó poco estrés agrícola, con lo que se dedujo que las zonas que se observaron con alto nivel de estrés, podría deberse a manejos ineficientes de carácter particular; como por ejemplo, un riego deficitario, bajo aporte de fertilizantes, o bien, algún caso de enfermedades de las plantas que generan estas zonas aisladas de alto estrés.

## 5.7 Uso de Energía para el Riego

Basándose en los resultados de la clasificación de cultivos y demanda hídrica, se realizó un análisis del uso de energía para riego, asociado a los cultivos localizados en pendiente y ladera de cerros. Por medio de la interpretación de las áreas de cultivo en conjunto con la información topográfica contenida en un modelo digital de terreno, se estimó el área de cultivos frutales y

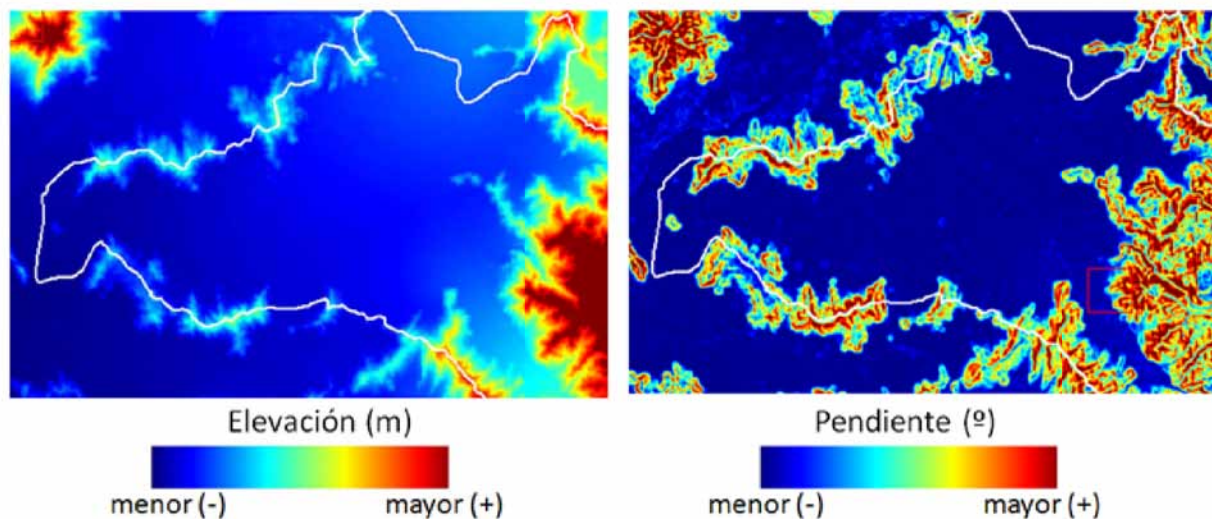
viníferos, que potencialmente pueden ser regados a través de métodos de riego tecnificados mediante el uso de bombas de impulsión de agua.

La información espacial de los cultivos clasificados fue intersectada con diferentes rangos de pendientes definidos según los rangos de pendientes de los materiales y métodos del estudio agrológico de la región (CIREN, 1996). De esta clasificación, se utilizaron los siguientes rangos: moderadamente inclinado, fuertemente inclinado, moderadamente escarpado y escarpado. En el **Cuadro 5.7** se indican las características de pendiente asociadas a cada rango.

**Cuadro 5.7.** Rango de pendientes en terrenos inclinados y escarpados.

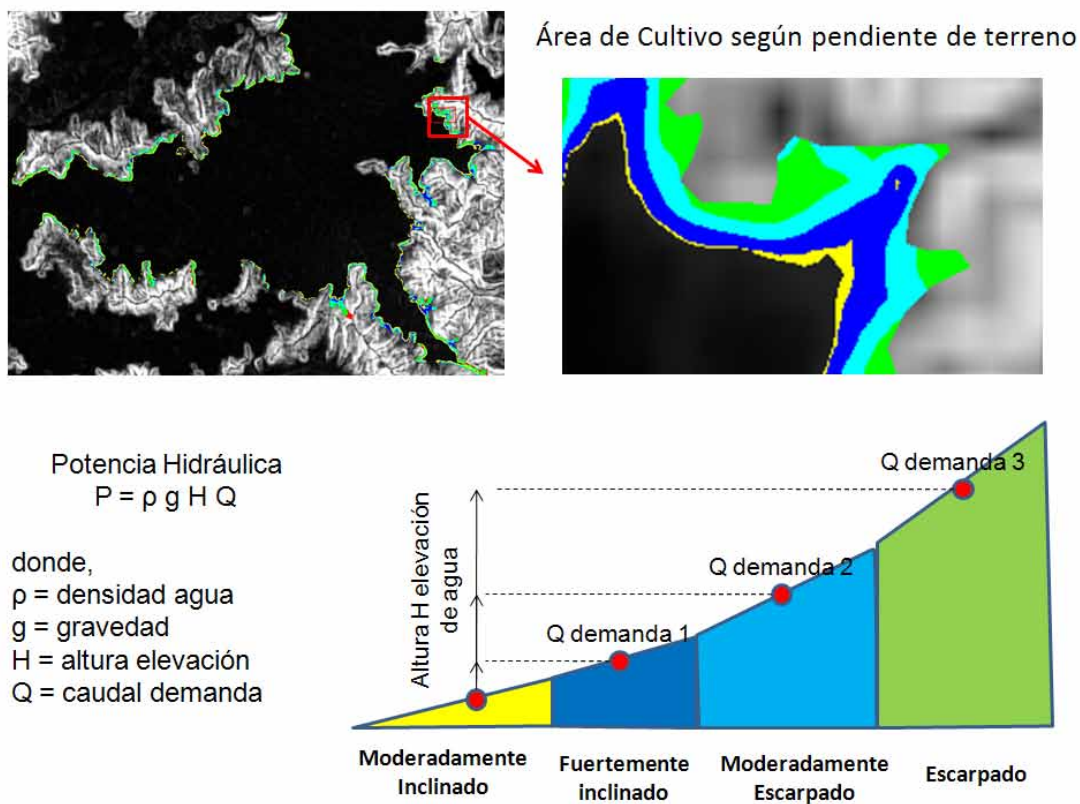
|                            | Rango de<br>pendiente | Rango de<br>pendiente |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                            | (%)                   | (°)                   |
| Moderadamente<br>inclinado | 8-15                  | 1.7 - 4.6             |
| Fuertemente inclinado      | 15-25                 | 4.6 - 8.5             |
| Moderadamente<br>escarpado | 25-45                 | 8.5 - 14              |
| Escarpado                  | 25-45                 | 14 - 24.2             |

La información topográfica base fue el modelo digital de elevación del terreno DEM SRTM (NASA, 2000), el cual se utilizó para calcular la pendiente de la superficie (ver **Figura 5.23**). Se identificaron las áreas que cumplen con la condición de pertenecer a cada uno de los rangos de pendientes determinados según el **Cuadro 5.7**. Posteriormente, se aplicó un segundo criterio de selección, que permitiera identificar por cada rango de pendientes los tipos de cultivos de frutales y viñas viníferas. Estos cultivos son los que potencialmente pueden ser regados por medios tecnificados asociados a sistemas más eficientes (tipo goteo), basados en la alimentación por impulsión de agua.

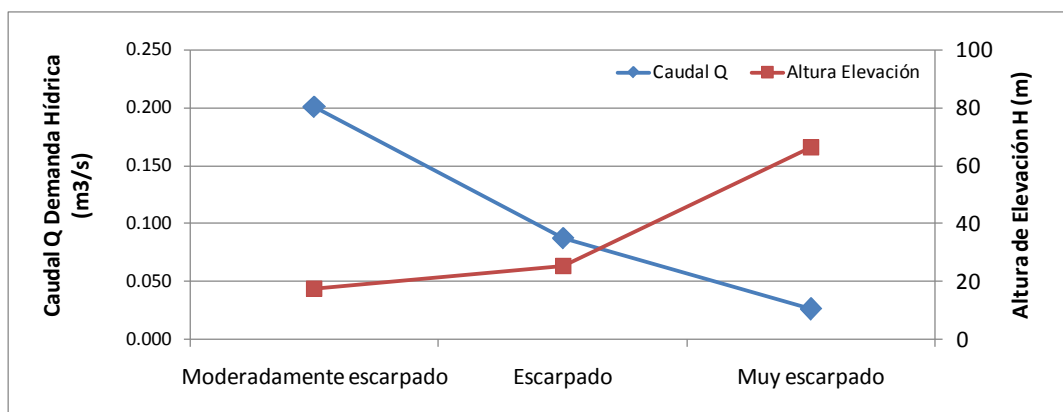


**Figura 5.23.** Elevación y pendiente, obtenida de modelo digital de terreno DEM STRM (NASA, 2000).

El resultado del cálculo de pendientes permitió identificar áreas (franjas) de diferentes rangos de pendientes, distribuidas a diferentes altitudes, según se muestra en la **Figura 5.24**. Para cada una de estas franjas de pendientes se calculó la altitud promedio, diferencia de altura de elevación, y la demanda hídrica asociada a los cultivos frutales y viníferos, según se indica en la **Figura 5.25**.



**Figura 5.24.** Estimación de áreas de cultivo según rango de pendientes, y esquema de cálculo de potencia hidráulica.



**Figura 5.25.** Gráfico de caudal y altura de elevación por rango de pendientes.

Para la estimación de los requerimientos energéticos, se estimó la Potencia Hidráulica (en unidad de W, *watts*) requerida para elevar la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos en pendiente según se detalla en el **Cuadro 5.8**. El cálculo se realizó para cada uno de los rangos de pendiente y altura. La ecuación utilizada para el cálculo se muestra a continuación:

$$Potencia\ Hidráulica\ (W) = \rho \left( \frac{kg}{m^3} \right) \times g \left( \frac{m}{s^2} \right) \times H\ (m) \times Q \left( \frac{m^3}{s} \right) \times \eta\ (adim)$$

donde,

$$\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right) = \text{densidad del agua; valor } 1000 \frac{Kg}{m^3}$$

$$g \left( \frac{m}{s^2} \right) = \text{aceleración de gravedad; valor } 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$H\ (m) = \text{Altura de elevación}$$

$$Q \left( \frac{m^3}{s} \right) = \text{Caudal}$$

$$\eta\ (adim) = \text{eficiencia; unidad adimensional}$$

Para el cálculo del **Cuadro 5.8**, se consideró que la altura desde la cual se eleva el agua es la cota equivalente al límite entre terreno moderadamente y fuertemente inclinado (pendiente 15%; ángulo 4.6°), y que el tipo de riego es por goteo (eficiencia aplicación 0.9). En base a esto, la potencia hidráulica requerida con una eficiencia  $\eta=1$ , da un valor total de potencia de 73.5 kW. Al incorporar una eficiencia más real, que considera el uso de sistemas de bombas de impulsión, se ajusta el factor de eficiencia a  $\eta= 0.8$ , entregando un valor total de potencia requerida de 92 kW. Como referencia, una bomba de 1/2 HP consume una potencia en torno a 0.4 W, por lo que la potencia hidráulica equivalente del área cultivada en pendiente podría ser abastecida por aproximadamente 230 bombas (con eficiencia de  $\eta= 0.8$ ) funcionando en forma permanente durante el período de riego.

El uso de la potencia hidráulica de 92kW en forma permanente (24 h de uso por día), requeriría de una energía de 66.2 MW·h por cada mes de riego.

**Cuadro 5.8.** Estimación de Potencia Hidráulica para riego en cultivos de pendiente.

|                         | Rango de pendiente | Rango de pendiente | Area Frutales y Viñas | Caudal Demanda Hídrica Máxima | Altura Promedio | Diferencia Altura | Diferencia Altura acumulada | Potencia Hidráulica |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
|                         | (%)                | (°)                | (ha)                  | (m <sup>3</sup> /s)           | (m)             | (m)               | (m)                         | (kW)                |
| Moderadamente inclinado | 8-15               | 1.7 - 4.6          | -                     | -                             | 396             | -                 | -                           |                     |
| Fuertemente inclinado   | 15-25              | 4.6 - 8.5          | 234.3                 | 0.201                         | 413.6           | 17.6              | 17.6                        | 34.6                |
| Moderadamente escarpado | 25-45              | 8.5 - 14           | 105.9                 | 0.088                         | 421.5           | 7.9               | 25.5                        | 22.0                |
| Escarpado               | 25-45              | 14 - 24.2          | 31.9                  | 0.026                         | 462.2           | 40.7              | 66.2                        | 16.9                |
| Total                   | -                  | -                  | 372.1                 | 0.315                         | -               | -                 | -                           | 73.5                |

### 5.7 Detección de cambios segunda imagen hiperespectral

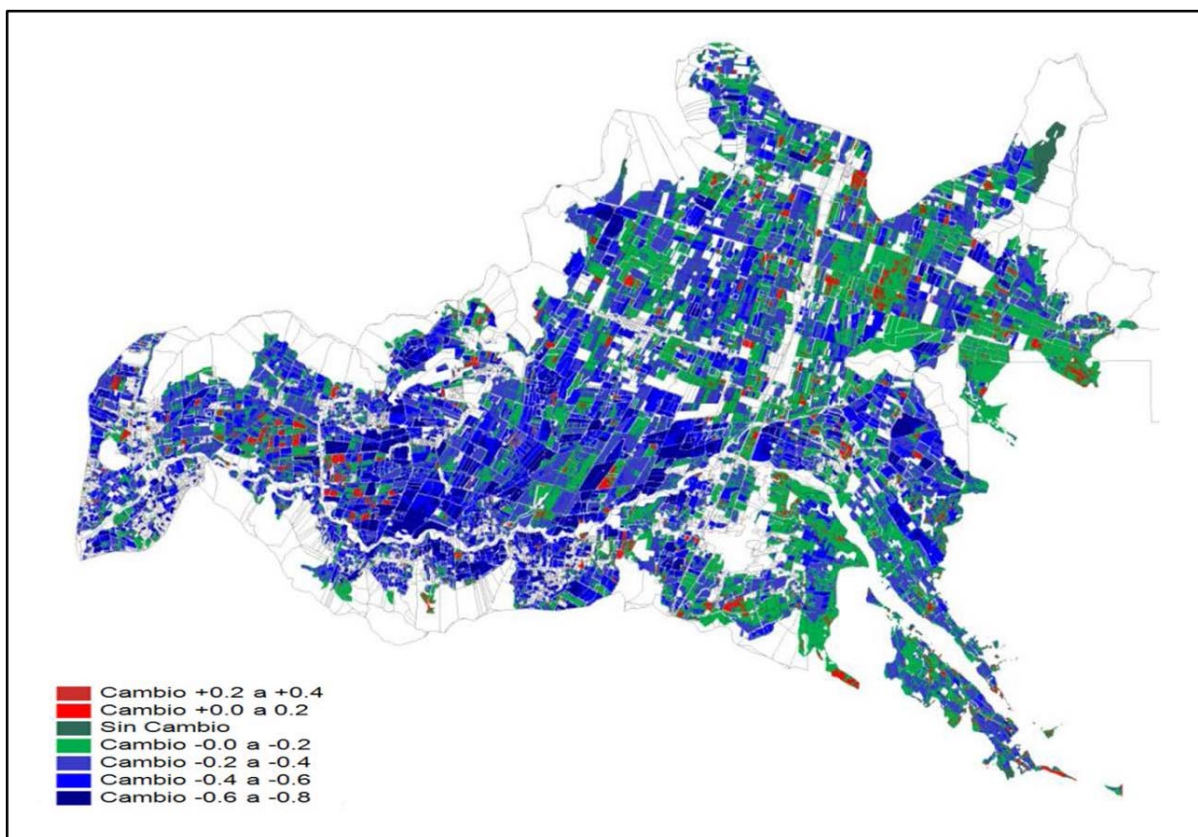
Como se mencionó en capítulos anteriores, se realizó un segundo vuelo en el mes de mayo 2012, en el que se registró la segunda escena hiperespectral. Este vuelo permitió conocer las diferencias existentes entre un período de máxima actividad agrícola (enero) con un período que se caracteriza por el reposo invernal de la mayoría de las plantas (mayo).

Realizando un cálculo de NDVI con la imagen hiperespectral de mayo y calculando la diferencia del mismo índice con la escena de enero, se obtuvo la **Figura 5.26**, la cual representa una detección de cambios en el vigor de la vegetación de la cuenca. El detalle del vigor NDVI de ambas fechas se encuentra en el **Plano N°11**, en tanto que el mapa de detección de cambio se encuentra en el **Plano N°12**.

En la **Figura 5.26**, se observa que la mayoría de la superficie disminuye su vigor en el período de mayo con respecto al período de la primera escena hiperespectral, denotado en la imagen por la dominancia de colores fríos (tonos de azul). Esta situación es esperable debido a la gran superficie de cultivos con ciclos biológicos anuales como el Maíz y los frutales de hoja caduca (80% del área cultivada), que tienen una actividad alta en el período estival que baja en invierno, presentando una gran diferencia de vigor entre ambos períodos. En general, los cambios mayores (NDVI entre -0,4 a -0,8) se dan en las áreas en las cuales se determinó el cultivo de Maíz, ya que estos predios pasan de un vigor alto a valores de NDVI cercanos a 0, es decir, suelo desnudo. En la imagen, se observan algunos casos de predios, asociados al cultivo del Maíz, en donde se registra una leve diferencia negativa de NDVI (de 0 a -0,2) entre ambos períodos, siendo estos lugares, cultivados presumiblemente con cultivos de invierno en el mes de mayo (rotación de cultivos), por ende, presentan cobertura vegetal en este período, disminuyendo la diferencia de NDVI con respecto a la escena anterior.

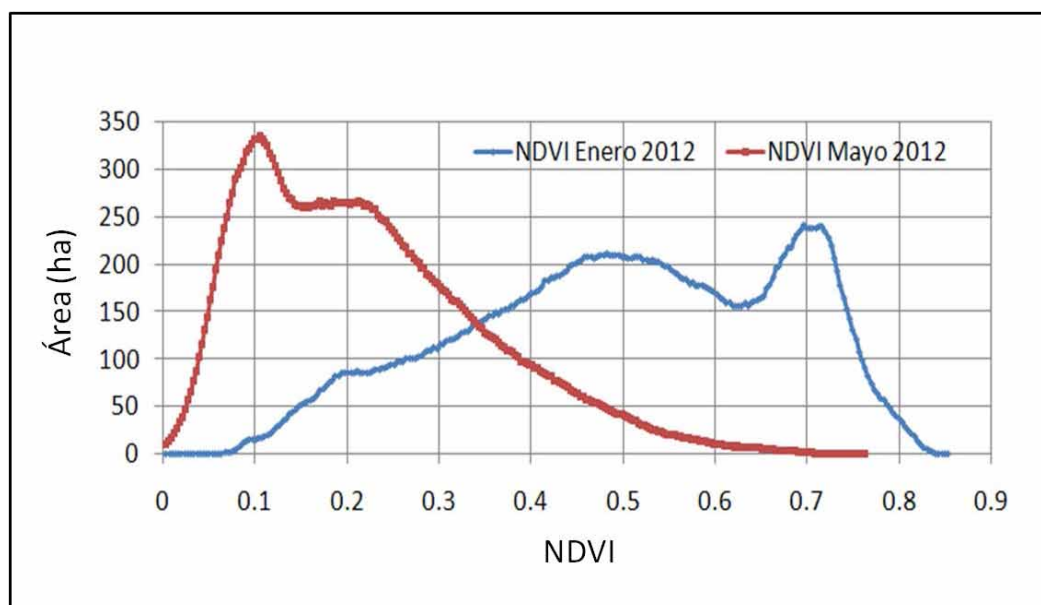
En el caso particular de los cultivos frutales, en general se observó que la diferencia de NDVI entre ambas escenas es marginal (colores verdes en la imagen, NDVI de 0 a -0,2) debido a que en mayo algunas especies frutales aún conservan sus hojas, las que en su mayoría están con colores amarillentos (observación de terreno), en pleno período de senescencia foliar, lo que provoca que la diferencia de NDVI sea menor que el registrado para el cultivo del Maíz.

Con relación a las zonas donde se observa una diferencia positiva de NDVI (colores rojos en la imagen), éstas se asocian tanto a los predios que se encontraban sin un uso agrícola durante la toma de la primera imagen (suelo desnudo) y que son utilizados en el mes de mayo para producir cultivos de invierno, por ende, presentan cobertura vegetal, como también, se asocian a algunos predios, en particular establecidos con cultivos frutales, que presumiblemente presentan malezas que emergen en invierno, aprovechando la época en la que no se aplican herbicidas y los suelos presentan contenidos de humedad aprovechables.



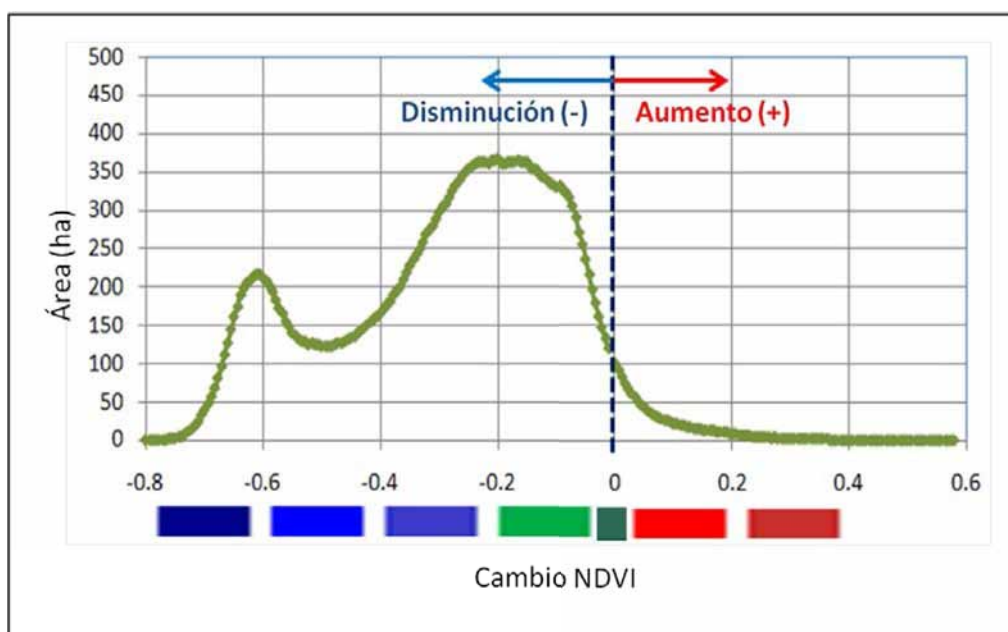
**Figura 5.26.** Detección de cambios en el vigor de la vegetación en la cuenca del río Claro.

Al comparar el área que tiene cada valor de NDVI (para enero y mayo 2012) se obtiene la **Figura 5.27**. Es destacable el cambio del vigor general de la cuenca entre ambas escenas registradas en este estudio. Como se observó para la captura de enero, en el valor de NDVI 0,7 se registra el peak de superficie, observándose la mayor superficie entre los valores de NDVI de 0,7 a 0,4. En cambio, la curva correspondiente a la imagen tomada en mayo, el peak se observó en el valor de NDVI 0,1, estando la mayor superficie entre los valores de NDVI de 0,1 a 0,3, valores que corresponden principalmente a suelos desnudos o con muy baja cobertura vegetal.



**Figura 5.27.** Histograma de NDVI para dos escenas hiperespectrales (enero y mayo 2012).

Al analizar las diferencias de NDVI para las escenas tomadas en este estudio (detección de cambios) se generó la **Figura 5.28**. Podemos observar en ella que la mayor parte de la superficie de la cuenca se encuentra asociada a una diferencia de NDVI negativa, manifestando una disminución considerable de la actividad de la vegetación en la cuenca de estudio en el mes de mayo. La diferencia más frecuente se encuentra entre -0,2 y -0,4, lo que explica la coloración principal del **Plano N° 12**. El área en la que se observó una diferencia positiva es bastante menor, y sólo se registran variaciones entre 0 y 0,2, mostrando que son pocos los predios que son usados para la producción de cultivos de invierno.

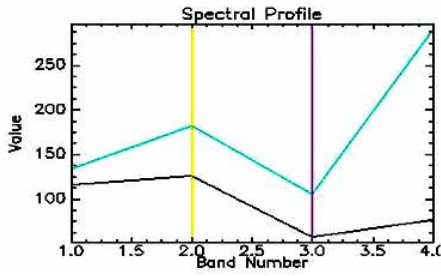
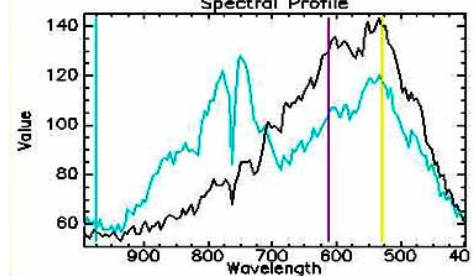


**Figura 5.28.** Histograma de la detección de cambio de NDVI.

## 5.8 Comparación de las Técnicas Multiespectral e Hiperespectral

A continuación en el **Cuadro 5.9** se presenta una comparación en cuanto a la resolución espacial, temporal, espectral, de la plataforma de adquisición y acceso a la información, y de las ventajas y desventajas de las técnicas de teledetección que se usaron en el presente estudio.

**Cuadro 5.9.** Resoluciones, ventajas y desventajas de las técnicas utilizadas.

|                      | Multiespectral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Hiperespectral                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Resolución Espacial  | Resolución espacial 2,4 a 30 m dependiendo del sensor. Las resoluciones más finas como el satélite Quickbird tiene un ancho de barrido en torno a 16,5 km, lo que hace que sea complicado usarlo en estudio de cuencas, debido al número de escenas necesarias para completar el mosaico. Un satélite como Landsat tiene un barrido de 185 km, lo que permite conformar una cuenca con 1 o pocas imágenes. | Resolución espacial $> 0,5$ m dependiendo del diseño de captura de información. Sensor tiene un campo de visión (FOV) fijo, por lo tanto la resolución espacial queda determinada por una combinación entre la altitud y la velocidad del vuelo. En el presente estudio la resolución espacial fue diseñada en 8 m (a una altitud de vuelo de 10.000 m), para maximizar el ancho de barrido de levantamiento de información. |
| Resolución Temporal  | Un satélite multiespectral como Quickbird tiene un tiempo de revisita entre 2,5 a 6 días, sin embargo se debe programar su adquisición con antelación. Un satélite como Landsat tiene trayectorias y fechas predeterminadas cada 16 días.                                                                                                                                                                  | La adquisición de imágenes hiperespectrales puede ser programada según los requerimientos del estudio. Las fechas de vuelo quedan sujetas a disponibilidad de condiciones meteorológicas.                                                                                                                                                                                                                                    |
| Resolución Espectral | Resolución espectral 4 a 7 bandas, que permite obtener una firma espectral discreta.<br><br>Se pueden observar características                                                                                                                                                                                          | Resolución espectral de 64 a 128 bandas, que permite obtener una firma espectral continua.<br><br>Se pueden observar características finas                                                                                                                                                                                               |

|                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                            | <p>gruesas de la vegetación como la diferencia entre la reflectividad roja e infrarroja. Se pueden estimar índices de banda ancha:</p> <p>-Verdor (NDVI, SAVI, SR, etc.)</p>                                                                                                                                                         | <p>de la reflectancia, que tienen que ver con absorciones específicas de la vegetación. Se pueden estimar índices de banda angosta:</p> <p>-Verdor</p> <p>-Eficiencia en cuanto uso de la luz</p> <p>-Pigmentos foliares</p> <p>-Carbono seco</p> <p>-Estrés Agrícola</p>                |
| Plataforma de adquisición y acceso a la información                                                                                        | <p>Plataforma satelital: Quickbird, Ikonos, Landsat, Modis, etc.</p> <p>Satélites de alta resolución principalmente manejados comercialmente por distribuidores (Ej: Quickbird, Ikonos). Satélites de menor resolución (Landsat, Modis) distribuidos por agencias públicas de EEUU (Glovis) o asociadas (CONAE, Arg.).</p>           | <p>Plataforma aerotransportada.</p> <p>Avión bimotor presurizado, no presurizado</p> <p>La información se levanta mediante contratación de estudio de imágenes, donde se especifican los objetivos, y en base a ello se planifica el vuelo, adquisición y procesamiento de imágenes.</p> |
| <p><b>Considerando las características del presente estudio, se resumen las principales características de los métodos utilizados:</b></p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Ventajas                                                                                                                                   | <p>+ Utilización de Landsat permite abordar el estudio de la subcuenca de estudio con una escena.</p> <p>+ Disponibilidad de escenas de bajo costo.</p> <p>+ Posibilidad de construir una serie multitemporal con escenas cada 16 días, o composición de ellas. Se puede lograr escala adecuada para caracterización fenológica.</p> | <p>+ Alto detalle espectral permite estudio de vegetación a través de firmas espectrales y características fisiológicas.</p> <p>+ Mejor resolución espacial que la alternativa multiespectral, permite estudio de predios pequeños.</p>                                                  |
| Desventajas                                                                                                                                | <p>+ Resolución espacial puede ser insuficiente para estudio de predios pequeños.</p>                                                                                                                                                                                                                                                | <p>+ Proceso de levantamiento y procesamiento de imágenes, requiere de un período de desarrollo.</p> <p>+ Costos medios asociados al proceso.</p>                                                                                                                                        |

## 6 CONCLUSIONES

El uso de la teledetección en la cuenca del Río Claro de Rengo, ha entregado información relevante para el manejo de cultivos y sus recursos hídricos asociados. A través del uso de las diversas técnicas de clasificación hiperespectral y multitemporal, por primera vez en Chile, se ha puesto a prueba la capacidad de discriminación de cultivos en el área agrícola a escala regional.

Los resultados obtenidos han permitido incorporar la componente espacial en la estimación hídrica. La clasificación de cultivos generada por teledetección, como también su consecuente estimación de demanda hídrica, han quedado espacialmente determinadas en un mapa con coordenadas que permite reconocer los patrones y heterogeneidades que presenta el consumo de agua dentro de la cuenca del río Claro de Rengo. La demanda hídrica no se da por igual dentro de la cuenca, por lo que puede ser de utilidad visualizar esta distribución espacial para efectuar un posterior diagnóstico de conflictos (déficit), en base a una comparación de oferta y demanda de agua. Junto con lo anterior, la metodología puede ser aplicada con una mayor frecuencia respecto a los métodos de relevamiento actual (censo agropecuario y catastro frutícola), posiblemente cada 1 o 2 años. Esto por un lado, permitiría contar con información más actualizada durante la brecha temporal que queda entre los censos, y permitiría enfrentar con mayor conocimiento los cambios dinámicos de la rotación de cultivos dentro de la cuenca. El aporte de estos resultados, espacialmente distribuidos y temporalmente más oportunos, permitirían suplir en parte la escasez de información existente y que sustentan el objetivo de este estudio. Esto permitiría apoyar a CNR en el rol de la identificación de la demanda hídrica y en la mejora en el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país.

Respecto al método de análisis, el trabajo presentado evaluó positivamente la clasificación por firmas hiperespectrales de polígonos de entrenamiento, pero no fue suficiente para estudiar todos los cultivos. En el caso de algunos cultivos cereales y forrajeros, la cobertura espacial relativamente homogénea y la señal de reflectancia de la biomasa, es suficientemente clara para poder discriminarlos; sin embargo, con otros cultivos como especies arbóreas la situación es desfavorable. Estos últimos presentan características dispares en cuanto a la distancia entre hileras, tipos de suelo, abundancia de malezas, etapas de crecimiento y manejo del predio, que dificultan el proceso de clasificación. Esta baja separabilidad se replica en el enfoque multitemporal.

En este contexto, la utilización de dichas técnicas se integraron en una “fusión de información”, donde se utilizó en forma complementaria todo elemento que aportaba al objetivo final del estudio. Por ejemplo, con el enfoque hiperespectral se pudo clasificar especies con características contrastantes de pigmentación y fisiología, sin embargo, es un método temporalmente acotado que no permite ver cultivos anteriores o posteriores al momento de la adquisición de la escena. Para complementar lo anterior, se utilizó un enfoque multitemporal que permitió estudiar el comportamiento fenológico de toda la temporada y clasificar los tipos de

cultivo, que con el enfoque hiperespectral no pudieron ser clasificados. Para las especies frutales que no pudieron ser discriminadas por el método de teledetección, se utilizó el catastro frutícola de la región.

Cabe señalar que las metodologías aplicadas no mostraron ser suficientes por si solas en el alcance de los objetivos, pero sí lo han mostrado siendo utilizadas en forma conjunta. Así, basándose en las capacidades de cada método, la clasificación de cultivos se efectuó fusionando las tres técnicas “hiperespectral + multitemporal + catastro”.

Entre los principales aportes del estudio, se señala la obtención de mapas de distribución de cultivos y mapas de demanda hídrica a nivel cuenca, que significan un paso importante en el manejo de información destinada a mejorar la gestión del riego en la cuenca de estudio. El desafío que se plantea a partir de estos resultados, es el de estudiar la adaptación y aplicabilidad de esta metodología a otras regiones y zonas geográficas, con el fin de extender y desarrollar una herramienta genérica que apoye el rol de CNR en el resto del país.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

Brizuela, A., Aguirre, C., Velasco, I., 2007. Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal, ISBN: 978-987-543-126-3.

CNR. 2012. Shapes Infraestructura de riego.

CNR (Comisión Nacional de Riego). 2008. Diagnóstico y caracterización de usuarios de agua y su demanda. Informe Final, Tomo Anexos. Ejecutado por Qualitas Agroconsultores Ltda.

CNR (Comisión Nacional de Riego). 2006. Programa de transferencia de conocimientos y habilidades para el manejo y desarrollo de cuencas hidrográficas (etapa II): Territorio río Claro de Rengo. Ejecutado por Sociedad Comercial Pineda y Fuentes Ltda., Silvoterra e Ingenieros Consultores.

CIREN-CORFO, 1989. Frutales de hoja caduca. Requerimientos de clima y suelo. Publicación CIREN nº 83. Centro de Información de Recursos Naturales, Santiago, Chile.

CIREN, 2009. Catastro frutícola 2009, principales resultados. Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Centro de Información de Recursos Naturales, Santiago, Chile.

DGA (Dirección General de Aguas). 2007. Estimación de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona II. Regiones V a XII y Región Metropolitana. Informe Final. S.I.T. Nº 123. Estudio elaborado por Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Ingenieros Consultores.

DGA (Dirección General de Aguas). 1996. Análisis de la oferta y demanda de recursos hídricos en cuencas críticas de Loa, Rapel y Mataquito. Volumen II: Cuenca del río Rapel. Ejecutado por Figueiredo Ferraz, Consultoría e Ingeniería de Proyecto Ltda. S.I.T. Nº 31.

DGA (Dirección General de Aguas). 1986. Estudio del Mapa Hidrogeológico Nacional, escalas 1:1.000.000 y 1:2.500.000. Ejecutado por IPLA Ingenieros Consultores. Santiago, Chile.

DGA (Dirección General de Aguas). 1985. Catastro general: Usuarios de aguas de la ribera sur del río Cachapoal y sus afluentes. Cuenca del río Rapel – VI Región. Tomo 1-6. Ejecutado por Cepa Ltda.

DGA (Dirección General de Aguas). 1984. Cuenca del río Claro de Rengo y del estero Zamorano: Catastro de usuarios. Ejecutado por Solano Vega y Asociados, Ingenieros Consultores. Santiago, Chile.

FAO, 1990. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. pp: 322.

Gausman, H.W. 1977. Reflectance of leaf components. Remote sensing of the environment 6 (1): 1-9 p.

- IMR (Ilustre Municipalidad de Rengo). 2006. Declaración de Impacto Ambiental: Reformulación plan regulador comunal de Rengo. Localidades de Rengo, Esmeralda y Rosario. En línea: [http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id\\_expediente=1735708](http://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesEvaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=1735708)
- INE, 2010. Información hortícola, publicación especial 2008-2009. Instituto Nacional de Estadísticas, Departamento de estadísticas agropecuarias y medioambientales, Santiago, Chile.
- Jimenez, 2009. Propiedades ópticas de trigo y deficiencias de nitrógeno. Tesis para optar al grado de maestro en ciencias, mención Edafología. Institución de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas. Texcoco, México.
- Lillesand TM, RW Kiefer, JW Chipman. 2004. Remote sensing and image interpretation. New York, USA. Wiley. 763 p.
- Manjarrez-Domínguez, C., C. Pinedo-Álvarez, C. Veléz-Sánchez y A. Pinedo-Álvarez. 2007. Separabilidad espectral de cultivos agrícolas con imágenes Landsat TM. Medio ambiente y desarrollo sustentable Vol. I, N°2: pp 48-56.
- NASA, 2000. "The Shuttle Radar Topography Mission". Base de datos DEM <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/>
- Peña Araya, M., 2007. Correcciones de una imagen satelital ASTER para estimar parámetros vegetacionales en la cuenca del río Mirta, Aisén. Bosque 28 (2) 162-172.
- Riaño, D., Salas, J., Chuvieco, E. 2000 .Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá, 222-239.
- Sánchez, A. y Morales, R. 2004. Las regiones de Chile. Editorial Universitaria. 262 p.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Serrano, S., T. Lasanta, A. Romo. 2003. Diferencias espaciales en la evolución del NDVI en la cuenca alta del Aragón: Efectos de los cambios de uso de suelo. Cuadernos de investigación geográfica N° 29. pp. 51-66.
- Soria R., J. Ortiz, G. Islas, and V. Volke. 1998. Sensores remotes. Principios y aplicaciones en la evaluación de los recursos naturales. Experiencias en México. Publicación especial 7. Sociedad mexicana de la ciencia del suelo, Chapingo, México.

## **Anexo 1**

---

## 1 CANALES DE RIEGO DE LA RIBERA SUR DE LA PRIMERA Y SEGUNDA SECCIÓN DEL RÍO CACHAPOAL

| Canal                       | Dotación<br>(m <sup>3</sup> /ha/año) | Sup. (ha)        | Origen de Aguas    |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------|
| <b>Primera Sección</b>      |                                      |                  |                    |
| Coligues Alto               | 18.400                               | 43,5             | Claro de Cauquenes |
| Coligues Bajo               | 18.400                               | 140              | Cachapoal          |
| Mal Paso                    | 18.400                               | 65               | Cachapoal          |
| Canal Olivar                | 18.400                               | 1.874,33         | Cachapoal          |
| Asoc. Canalistas Ribera Sur | 18.400                               | 1,66             | Cachapoal          |
| Comunidad                   | 18.400                               | 3.055,46         | Cachapoal          |
| Crianza                     | 18.400                               | 794,74           | Cachapoal          |
| Gultro                      | 18.400                               | 451,14           | Cachapoal          |
| Isla y Zumaeta              | 18.400                               | 580,04           | Cachapoal          |
| Jordán y Valdés             | 18.400                               | 1.305,33         | Cachapoal          |
| Perales                     | 18.400                               | 390,2            | Cachapoal          |
| Peumal                      | 18.400                               | 1.492,2          | Cachapoal          |
| Río Seco                    | 18.400                               | 3.478,93         | Cachapoal          |
| Cerro                       | 18.400                               | 2.100,78         | Cachapoal          |
| Apaltas                     | 18.400                               | 5.436,87         | Cachapoal          |
| <b>Segunda Sección</b>      |                                      |                  |                    |
| Copequén                    | 18.400                               | 544,7            | Cachapoal          |
| Zuñiga                      | 18.400                               | 479,63           | Cachapoal          |
| Toquihua                    | 18.400                               | 972,78           | Cachapoal          |
| Monte Lorenzo 1 y 2         | 18.400                               | 239,09           | Cachapoal          |
| <b>Total</b>                |                                      | <b>16.451,46</b> |                    |

Fuente: DGA, 1996

## 2 ACCIONES DE APROVECHAMIENTO DE AGUA POR SECCIÓN Y CANALES PRINCIPALES

1. Primera sección: 490,6 acciones en ribera sur

### Canales:

- Asociación de Canalistas de la Ribera Sur (433,7 acciones): Cerro y Peumal, Crianza, Comunidad, Perales, Jordán y Valdés, Apaltas, Río Seco, Gultro e Isla y Zumaeta
- Asociación canal El Olivar (42,7 acciones)
- Mal Paso y Coligues (14,2 acciones)

2. La segunda sección: 4 canales de la ribera sur, captan 4.450 acciones

### Canales:

- Copequén (500 acciones)
- Zuñiga (1.800 acciones)
- Toquihua (1.800 acciones)
- Monte Lorenzo (350 acciones)

## 3 DOTACIÓN DE AGUAS RÍO CACHAPOAL

Estimación se basa en el supuesto de los siguientes valores:

Tiempo de riego 200 días al año

Tiempo de riego 8 horas al día

Eficiencia del riego: 50%

Se asumieron tres caudales tipo que están en relación con el estado de la infraestructura del canal y su eficiencia en la conducción del agua (pérdidas, infiltraciones, mal estado de sus obras de arte, etc.).

a) Canal de buena eficiencia de conducción:  $Q = 2,13 \text{ l/s}$

b) Canal de regular eficiencia de conducción:  $Q = 1,69 \text{ l/s}$

c) Canal de mala eficiencia de conducción:  $Q = 1,25 \text{ l/s}$

Estos caudales tipo también reflejan una dotación segura o eventual de agua (canales matrices directos del río Cachapoa<sup>1</sup> o derrames, por ejemplo). En general a los canales derivados directamente del río se les asignó un  $Q = 2,13$  l/s. A los sub-derivados, sub-sub-derivados y algunos derrames importantes se les asignó un  $Q = 1,69$  l/s y a los derrames  $Q = 1,25$  l/s.

Con lo anterior, se obtiene que:

1. Derivados principales del río: 18.400 m<sup>3</sup>/ha/año
2. Sub-derivados y algunos derrames importantes: 14.600 m<sup>3</sup>/ha/año
3. Derrames: 10.800 m<sup>3</sup>/ha/año

## 4 CANALES DE RIEGO DE LA RIBERA SUR DE LA PRIMERA Y SEGUNDA SECCIÓN DEL RÍO CLARO DE RENGO

### CANALES DE LA CUENCA DEL RIO CLARO DE RENGO

#### SUPERFICIES Y USUARIOS

| A.- Primera Sección Legal      | Usuarios     | Superficie (há) |
|--------------------------------|--------------|-----------------|
| 1.- Bisquertt o Toribiano      | 8            | 145,85          |
| 2.- Bollenar                   | 1            | 23,50           |
| 3.- Cordova                    | 9            | 29,58           |
| 4.- Las Nieves                 | 1            | --              |
| 5.- Chanqueahue-Cerrillos      | 332          | 786,93          |
| 6.- El Peñón                   | 169          | 791,11          |
| 7.- El Rincón                  | 1            | 86,00           |
| 8.- Lo de Lobos                | 163          | 285,31          |
| 9.- Lorenzoni                  | 4            | 43,60           |
| 10.- Mendoza                   | 11           | 78,30           |
| 11.- Mira                      | 22           | 41,18           |
| 12.- Molinana                  | 27           | 128,30          |
| 13.- Molino Chico              | 7            | 72,60           |
| 14.- Molino                    | 61           | 236,10          |
| 15.- Pedregal                  | 15           | 96,20           |
| 16.- Población y Municipalidad | 328          | 601,59          |
| 17.- Popeta                    | 41           | 510,45          |
| 18.- Pretil                    | 19           | 151,30          |
| 19.- Ramirano                  | 73           | 370,41          |
| 20.- Saavedra                  | 1            | 30,00           |
| 21.- San Judas                 | 1            | 50,40           |
| 22.- Santa Margarita           | 88           | 209,11          |
| 23.- Talhuén                   | 1            | 4,00            |
| 24.- Urbina                    | 44           | 33,19           |
| 25.- Vertiente Popeta          | 3            | 2,40            |
| 26.- Vertiente Cantarrana      | 19           | 40,90           |
| <b>Total Primera Sección</b>   | <b>1.449</b> | <b>4.848,31</b> |

B.- CANALES DE LA SEGUNDA SECCION DEL RIO CLARO DE RENGU Y AFLUENTES

| <u>Del Río Claro de Rengo, 2° Sección</u> | <u>Usuarios</u> | <u>Superficie (Há)</u> |
|-------------------------------------------|-----------------|------------------------|
| 1.- Alegría                               | 45              | 46,70                  |
| 2.- Besoain                               | 30              | 242,30                 |
| 3.- Carrizal                              | 66              | 58,05                  |
| 4.- Del Cerro                             | 57              | 148,10                 |
| 5.- Farías Machuca                        | 51              | 67,05                  |
| 6.- Las Rosas                             | 3               | 6,00                   |
| 7.- La Cartagena                          | 52              | 31,03                  |
| 8.- Manchenes                             | 76              | 644,85                 |
| 9.- Molino de Tunca                       | 116             | 221,95                 |
| 10.- Palmino                              | 78              | 122,60                 |
| 11.- Panquehue                            | 312             | 525,15                 |
| 12.- Punta de Tunca                       | 373             | 919,58                 |
| 13.- San Alberto o Chuchué                | 183             | 1.016,83               |
| 14.- San Luis                             | 60              | 494,80                 |
| 15.- San Pedro                            | 73              | 315,30                 |
| 16.- Santa Rita o Las Rosas Dos           | 20              | 31,40                  |
|                                           | <u>1.595</u>    | <u>4.891,72</u>        |

De Vertientes y Derrames en la 2° Sección

|                       |           |              |
|-----------------------|-----------|--------------|
| 1.- Aguas Claras      | 42        | 193,45       |
| 2.- Bordalito         | 21        | 67,30        |
| 3.- Corcolén          | 91        | 107,35       |
| 4.- Derrames La Peña  | 30        | 102,80       |
| 5.- El Milagro        | 39        | 51,20        |
| 6.- El Valero         | 79        | 75,75        |
| 7.- Infiernillo       | 12        | 7,90         |
| 8.- Jacinto Vergara   | 34        | 40,20        |
| 9.- Las Arayas        | 16        | 60,15        |
| 10.- Molino Manríquez | 12        | 47,70        |
| 11.- Pío V            | 16        | 50,30        |
| 12.- Valdobinos       | <u>20</u> | <u>57,80</u> |
|                       | 412       | 861,40       |

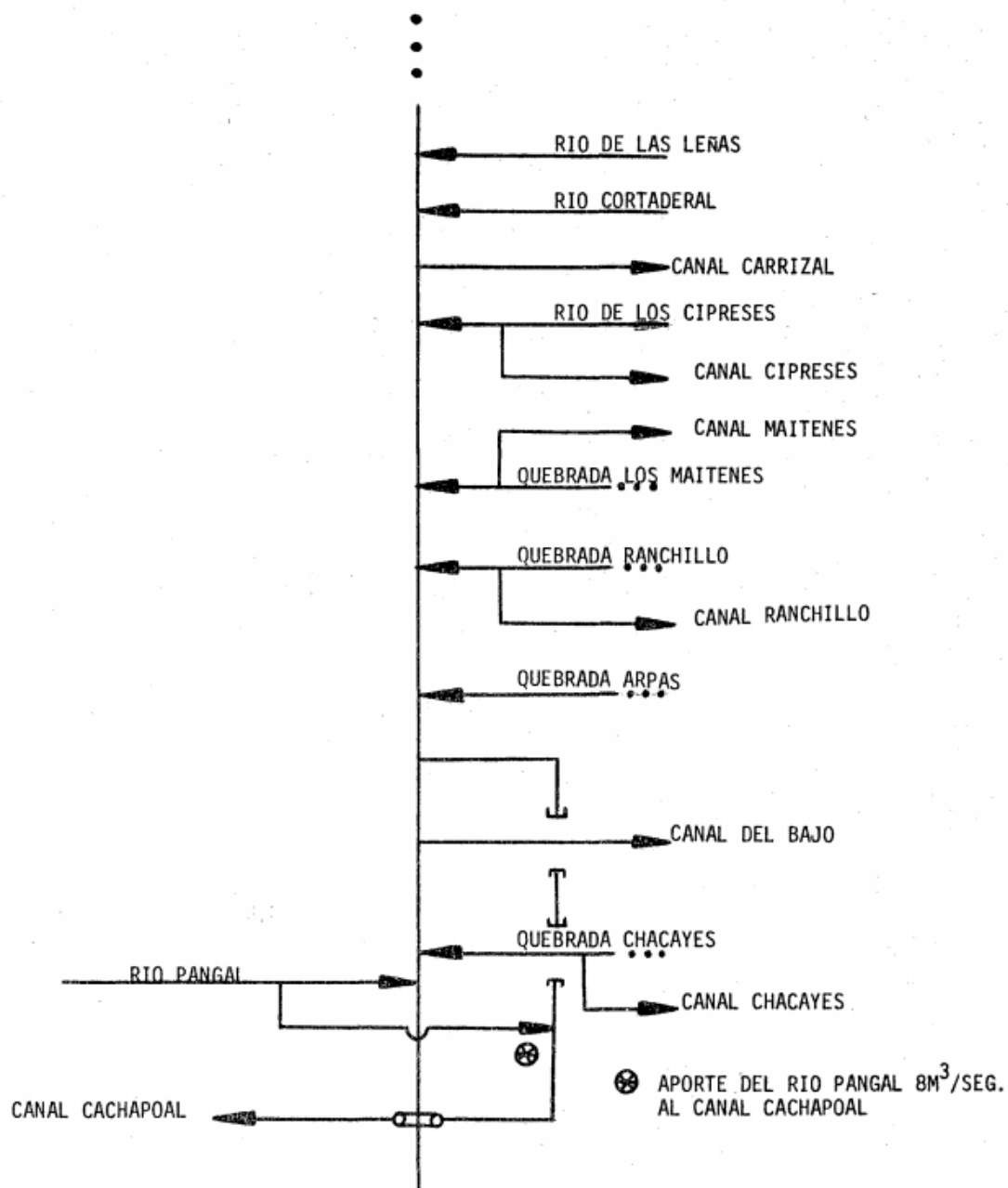
| <u>De Estero Malambo</u>        | <u>Usuarios</u> | <u>Superficie (há)</u> |
|---------------------------------|-----------------|------------------------|
| 1.- Paula Urrutia               | 56              | 255,57                 |
| <br><u>Del Estero Caracoles</u> |                 |                        |
| 1.- Uraco                       | 6               | 104,90                 |

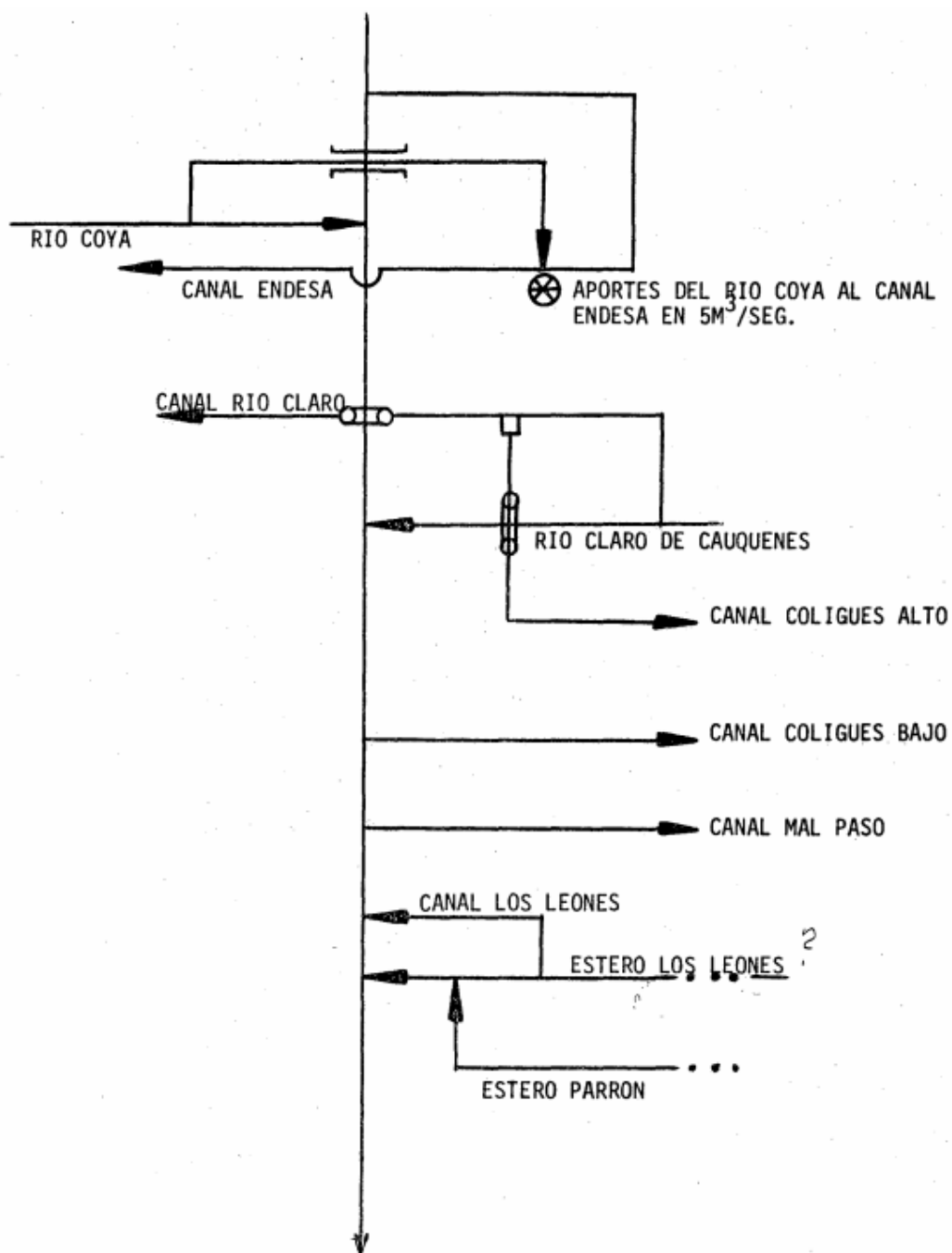
## **Anexo 2**

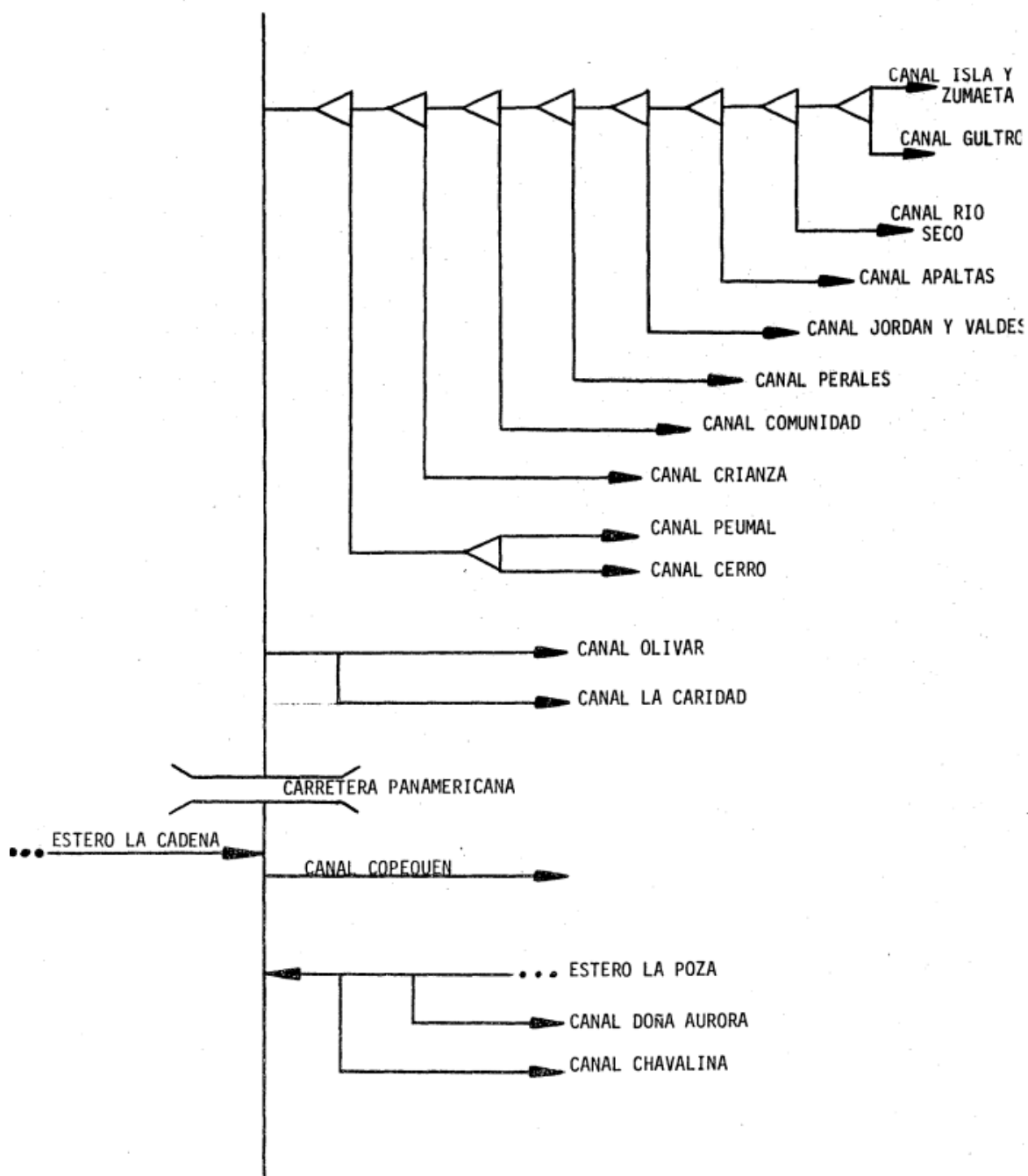
---

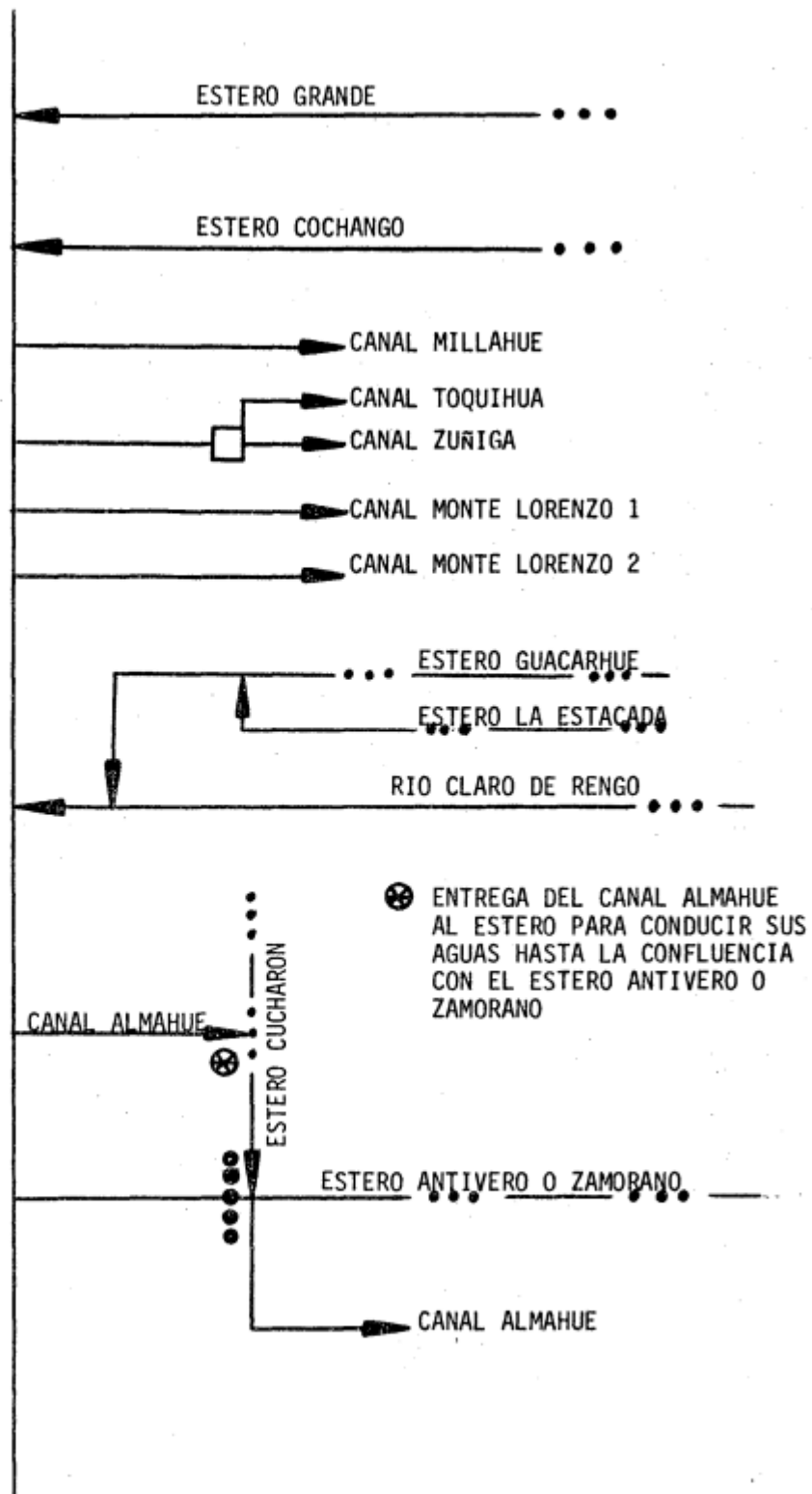
# 1 UNIFILAR RIBERA SUR RÍO CACHAPOAL

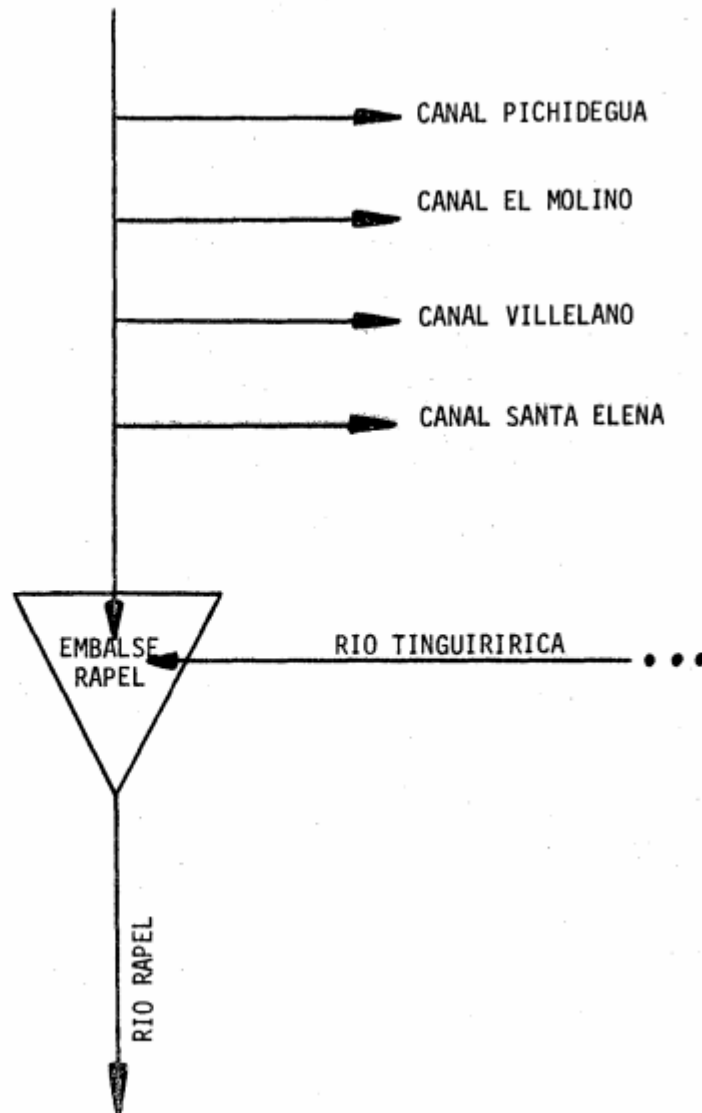
## UNIFILAR GENERAL RIBERA SUR RIO CACHAPOAL



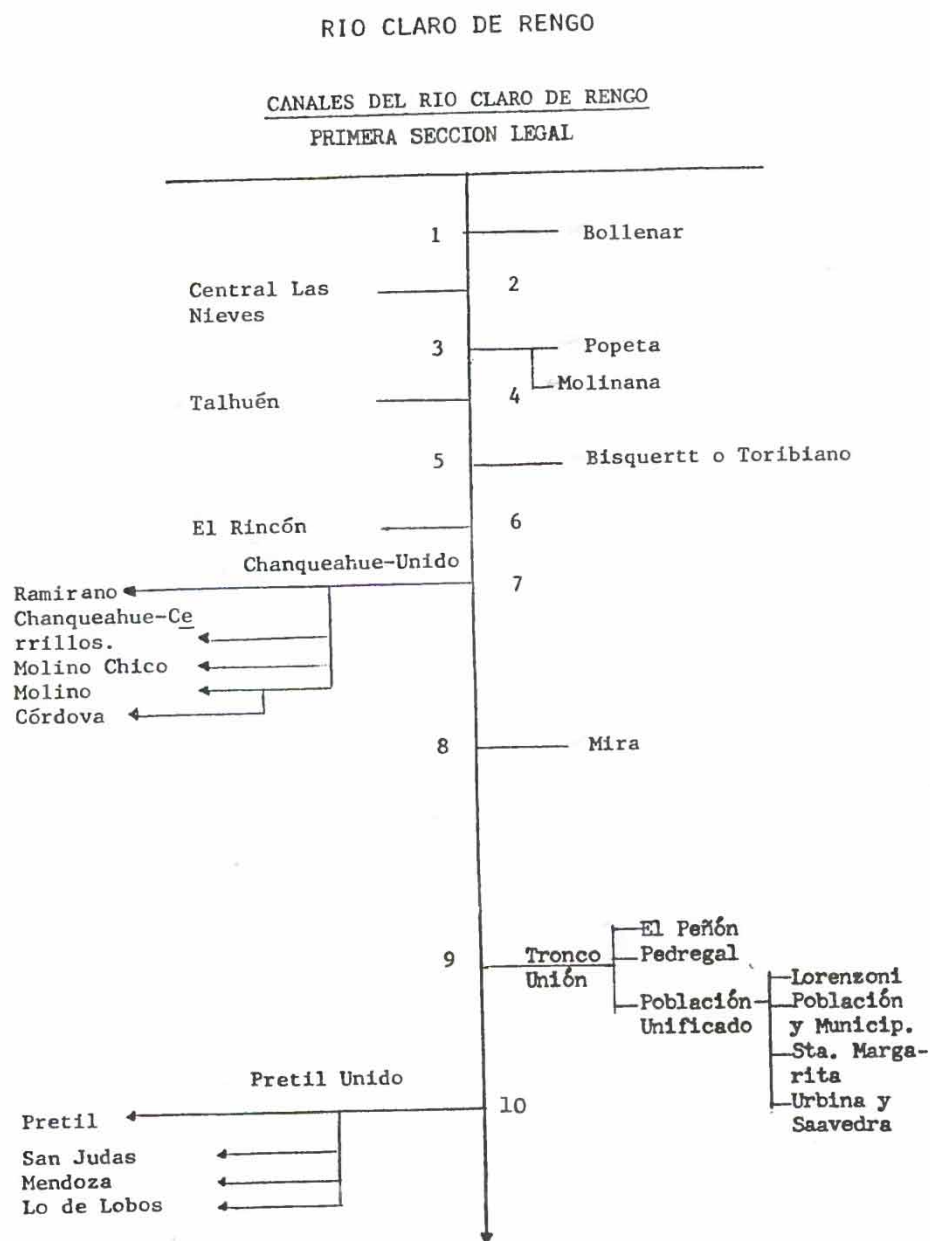






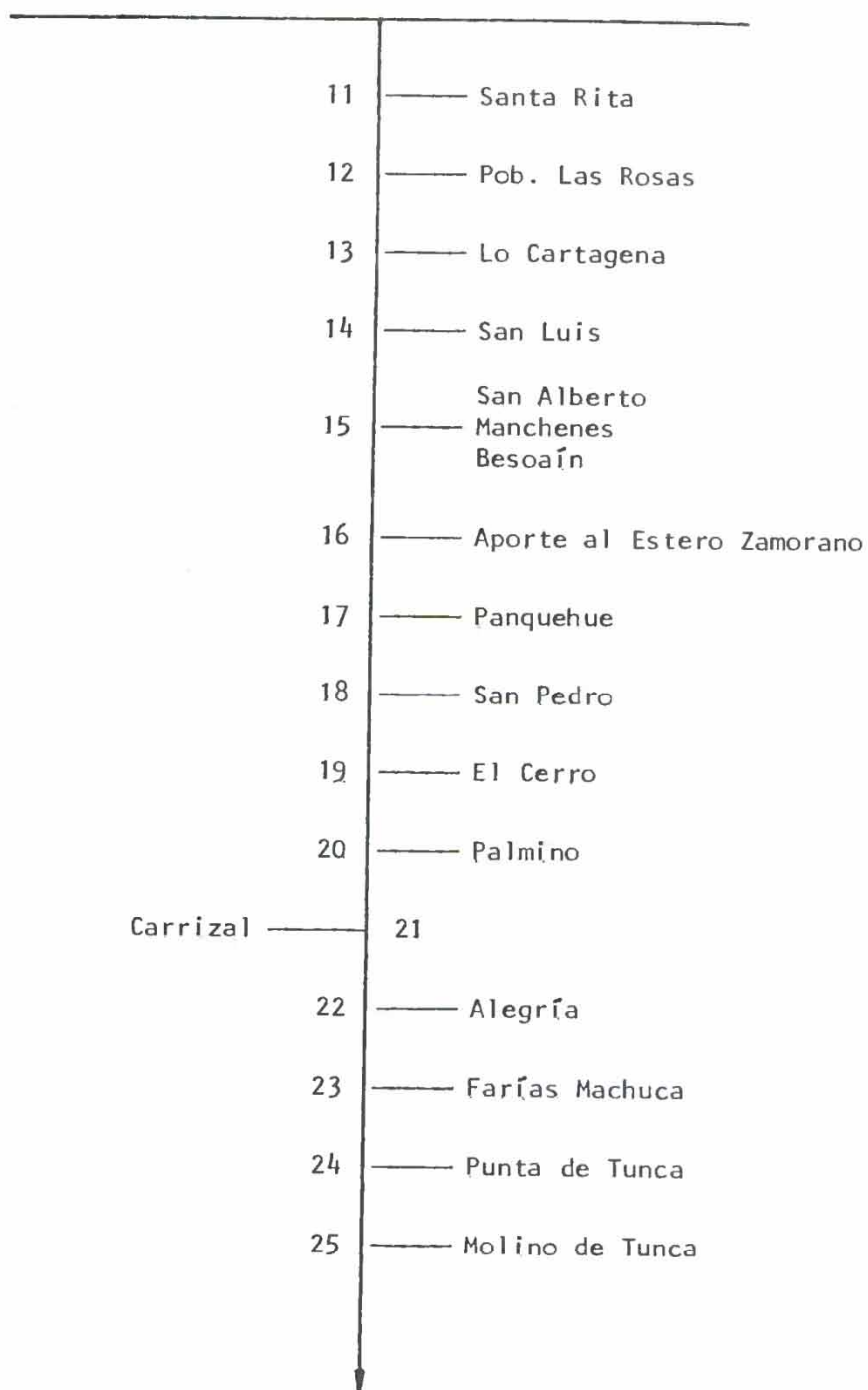


## 2 UNIFILAR RÍO CLARO DE RENGÓ



## RIO CLARO DE RENGO

### Segunda Sección



## **Anexo 3**

---

## 1 ASPECTOS ECOFISIOLÓGICOS DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS

A partir de la información de uso de suelo obtenida del Catastro Frutícola (CIREN, 2009) en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, se realizó una caracterización y descripción fenológica de los principales cultivos frutícolas y hortícolas encontrados en la región. El objetivo de esta actividad fue conocer los distintos estados fenológicos por los que transcurre el ciclo productivo de los cultivos, debido a que es el principal factor que influye en la actividad fotosintética y, por lo tanto, en el vigor registrado a través de los índices vegetacionales.

### 1.1 Cultivos frutícolas

Los cultivos frutícolas y su caracterización y descripción fenológica se presentan a continuación.

#### a) Vid.

**Nombre científico:** *Vitis vinífera* L.

**Nombre común:** Vid, Parra.

**Características generales:** La Vid es un frutal caducifolio, trepador y leñoso originario del suroeste de Asia. Es una planta perenne de ciclo anual y tiene la particularidad de presentar dentro del año el ciclo reproductivo y vegetativo en forma conjunta. En general, es un frutal de pocos requerimientos nutricionales y edáficos, por lo que los sitios de producción pueden estar ubicados en suelos pedregosos, con pendiente o poco profundos. Con relación al clima, la vid es una planta adaptada al clima mediterráneo que requiere de cierta cantidad de horas-frío (dependiendo de la variedad) para salir del receso invernal como también temperatura cálida y radiación solar moderada para la correcta maduración de sus frutos. La Vid es bastante resistente a las heladas invernales, debido a su característica de frutal de hoja caduca, sin embargo, en la época de floración (primavera) es muy sensible, pudiendo incluso reducir su producción de frutos de manera considerable debido a este factor climático.

Los marcos de plantación dependen de varios factores tanto antrópicos, climáticos como también geográficos del lugar de producción. Sin embargo, las distancias más frecuentemente utilizadas son las siguientes: Uva de mesa: 4 x 4 m, en sistema de conducción de parrón español y Uva para elaboración de vino: 1 x 1,5 m, en sistema de conducción en espaldera.

Lo anterior, es muy relevante teniendo en consideración la interpretación del cultivo a través de imágenes espaciales, ya que una conducción estilo Parrón español cubre casi toda la superficie del suelo. Al contrario se observa en la conducción tipo espaldera, utilizada principalmente para reducir el vigor de la planta, donde la cobertura es notoriamente menor.

Dependiendo de la zona geográfica, clima y características edáficas donde se cultive la Vid, ésta tendrá distintas características productivas. A su vez, las distintas cepas de esta especie, adquieren expresiones diferentes, debido principalmente a su adaptabilidad a condiciones edafoclimáticas y a los diferentes manejos agronómicos propios del uso productivo que se le quiere dar a la uva (consumo fresco o deshidratado, elaboración de vinos o destilados, entre otros). Sin embargo, en todos los casos en la Vid se observan los mismos estados fenológicos, independiente del fin productivo, los cuales varían en duración y las fechas de inicio y término de estos procesos biológicos (variedades tempranas o tardías, etc.).



**Figura 1.** Vid.

**Ciclo biológico:** Comenzando desde el receso invernal hasta la caída de las hojas. Las fechas indicadas a continuación corresponden a estimaciones para la zona central de Chile.

- **Hinchamiento de yemas:** Ocurre aproximadamente a finales de julio a agosto, dependiendo de la intensidad y duración del invierno. Corresponde al estado de activación de las yemas latentes luego del receso invernal y, se reconoce por un hinchamiento de las yemas y una posterior pérdida de la estructura protectora de éstas. También, se observa una exudación de los sarmientos (tallos de la temporada pasada) que fueron podados. Finaliza con la aparición de las primeras hojas.
- **Hojas incipientes:** Se reconoce con la salida de las hojas y la expansión de éstas. Ocurre con el aumento de las temperaturas a mediados de septiembre. En esta etapa la Vid comienza su actividad fotosintética, toda la energía utilizada en los procesos anteriores fue la almacenada en las raíces en la temporada anterior.
- **Floración y cuajado:** Con el comienzo de la actividad fotosintética y el crecimiento acelerado de la Vid, los tallos comienzan a alargarse y se aprecian una mayor cantidad de nudos sosteniendo a las hojas. También se observa que los racimos florales crecen a medida que la fotosíntesis de las hojas es mayor. Estos racimos se alargan y, los botones florales, que en un comienzo se encontraban juntos, se separan. Este estado fenológico ocurre generalmente entre octubre y noviembre. Los botones de los racimos abren y dejan visibles las flores que se encontraban en su interior, permitiendo así la polinización o cuajado. Este proceso está fuertemente influenciado por el clima y los manejos agronómicos como el raleo, densidad de canopia y aplicaciones de hormonas para el control de esta etapa. Este proceso ocurre generalmente entre los meses de diciembre y enero.
- **Crecimiento de bayas y Envero:** En esta etapa la actividad fotosintética está principalmente enfocada a suplir los requerimientos nutricionales de los frutos en crecimiento. Existe un aumento en el tamaño de las bayas a finales de enero a febrero (dependiente de la variedad de la Vid) la que finaliza con el Envero o coloración de los frutos aproximadamente a inicios de marzo.
- **Caída de hojas:** En general, la actividad de la Vid comienza a disminuir a mediados de abril, en donde la planta comienza a almacenar la energía proveniente de la fotosíntesis en el tronco y principalmente las raíces. La clorofila, pigmento que le otorga la coloración verde de las hojas, comienza a disminuir debido a la asimilación de los elementos que la constituyen, por lo que otros pigmentos que se encuentran en menor proporción empiezan a distinguirse más. Esto provoca, que la coloración de las hojas se torne rojiza y/o amarillenta. Este proceso de senescencia de la hoja culmina con la caída de éstas y la entrada en receso invernal de la planta, en donde la actividad metabólica se reduce casi completamente.

**b) Kiwi**

**Nombre científico:** *Actinidia deliciosa*, *A. chinensis*

**Características generales:** Frutal caducifolio de hábito de crecimiento tipo trepador, originario de Asia. Es un frutal muy vigoroso, muy similar a la Vid, tanto en su morfología como en el sistema de conducción utilizado. Es un frutal que en reposo o dormancia vegetativa es muy resistente a heladas, pero en épocas de crecimiento activo es muy sensible a las bajas temperaturas. Las principales variedades cultivadas en Chile se dividen en productivas (plantas hembras): Hayward, Monty, Bruno, Allison y Abbot, y las que se utilizan como polinizantes (plantas macho): Mutua, Tomuri y M3.



**Figura 2.** Kiwi.

**Ciclo biológico:**

- **Brotación:** Las yemas que permanecían en receso invernal de la temporada pasada comienzan a hincharse observándose una estructura protectora pilosa. Este estado finaliza con la aparición de hojas incipientes de las yemas. Este proceso en la región de estudio ocurre desde finales de agosto a principios de septiembre.
- **Crecimiento de hojas y florecencia:** Con el inicio de las temperaturas más cálidas en septiembre y octubre comienza el crecimiento activo del Kiwal, se observa un ensanchamiento de las hojas y elongación de los tallos (sarmientos) hasta alcanzar su tamaño definitivo. La floración del Kiwi se manifiesta durante el mes de noviembre.
- **Crecimiento de fruto y cosecha:** La aparición de frutos pequeños comienza a inicios de diciembre los cuales crecen hasta alcanzar su tamaño definitivo a mediados de febrero-marzo, época en que son cosechados.
- **Receso invernal:** La disminución de la actividad fotosintética en el Kiwal ocurre a mediados de mayo, siendo la caída de hojas principalmente en junio.

**c) Duraznero y Nectarín**

**Nombre científico:** *Prunus pérsica* L.

**Características generales:** El duraznero es un frutal de tamaño generalmente pequeño (3 a 5 metros de altura), caducifolio perteneciente a la familia taxonómica de *Rosaceae* de origen Asiático (China). Presenta una gran cantidad de variedades que se adaptan a múltiples condiciones climáticas y edáficas, lo que otorga una gran posibilidad de sitios posibles de producción y características fenotípicas. Entre los grupos de variedades más destacadas están Nectarines (árbol más temprano y fruto sin vellosidades), Durazno conservero (fruto más jugoso) y Diamante (adaptado a condiciones más cálidas, con menos requerimientos de horas-frío). Posee una elevada susceptibilidad a niveles freáticos superficiales, debido a la baja aireación que provoca esta condición en las raíces.

El ciclo productivo del duraznero está fuertemente influenciado por la variedad en específico. Existen variedades tempraneras que completan los distintos procesos biológicos de la planta en mucho menor tiempo y con requerimientos climáticos distintos a las variedades más tardías. El duraznero tiene la particularidad que su ciclo reproductivo lo realiza antes del inicio del brote de las yemas vegetativas, por lo tanto, la floración ocurre con el árbol sin hojas.



**Figura 3.** Durazno.

**Ciclo biológico:** Comienza desde el receso invernal hasta tener un fruto maduro (cosecha).

- Brotación: la activación de la planta del receso ocurre generalmente a finales del mes de julio a principio de agosto, donde se observa un hinchamiento y brote de las yemas florales.
- Floración: corresponde a la apertura de las yemas florales y la polinización de las flores. Frecuentemente en la zona central de Chile este proceso ocurre en el mes de septiembre.

- Fruto en crecimiento: corresponde a la etapa en que se observa la caída de los pétalos y estructuras florales, hasta el término del crecimiento del fruto. Este proceso tiene lugar en el mes de octubre.
- Ciclo vegetativo: en general las yemas vegetativas comienzan a brotar en la etapa fenológica de Fruto en crecimiento, alcanzando su peak de actividad fotosintética en los meses de enero y febrero, en donde se observa una mayor cobertura de la canopia. La actividad fotosintética, comienza a disminuir gradualmente en los meses de marzo - abril, con el comienzo del otoño.
- Caída de hojas: Las variedades más tempranas comienzan la senescencia de hojas a finales del mes de abril, pero existen otras variedades (por ejemplo Fairlane) que presentan esta etapa en el mes de junio.

#### **d) Ciruelo (japonés y europeo)**

**Nombre científico:** *Prunus domestica* L. (Ciruelo europeo) y *Prunus salicina* L. (Ciruelo japonés).

**Características generales:** Frutal de hoja caduca perteneciente taxonómicamente a la familia *Rosaceae*. En general, es un árbol resistente a las heladas de invierno y posee gran adaptación a diversos tipos de suelo, debido a la utilización de patrones o porta injerto que otorgan a la planta diferentes características. Es una especie con diversas variedades que presentan distintos usos siendo el principal la ciruela deshidratada (ciruelo europeo)

Las principales variaciones en los períodos de inicio y término de los estados fenológicos en el ciruelo, se deben principalmente a la variedad de la que se trate. En estas fechas se observan diferencias de algunas semanas hasta un mes, dependiendo de si la variedad es temprana, tardía o intermedia. Otro factor importante en el desarrollo del cultivo son los patrones o porta injerto utilizados, éstos también pueden tener características de retraso o adelantamiento de la fenología. En general, presenta una duración del ciclo vegetativo de 220 a 250 días.



**Figura4.** Ciruelo.

**Ciclo biológico:**

- Receso invernal: Período de reposo total e inactividad de procesos metabólicos. Se presenta en los meses de mayo, junio y julio.
- Brotación: Ruptura del receso invernal, se manifiesta por hinchamiento de yemas. Se presenta en el mes de agosto.
- Floración: Aparición y apertura de flores. Se realiza la polinización y fecundación. Presenta una ocurrencia frecuente en los meses de agosto y septiembre.
- Foliación: Presencia de hojas. Se presenta después de la floración. En los meses de septiembre y octubre.
- Maduración del fruto: Época en que el fruto reúne las condiciones deseadas para ser cosechado. En los meses de diciembre, enero y febrero, dependiendo de la variedad cultivada.
- Caída de las hojas: Entrada nuevamente en el período de receso invernal. En los meses de abril y mayo.

### e) Cerezo

**Nombre científico:** *Prunus avium* L. (Cerezo dulce) *Prunus cerasus* L. (Cerezo ácido o guindo)

**Características generales:** El cerezo es un árbol caducifolio que se desarrolla ampliamente en Chile, sobre todo en la zona sur, tanto por sus requerimientos de frío (700 a 1000 horas-frío) como por su preferencia a suelos de carácter ácido, sin embargo, últimamente se han establecido cultivares de menores requerimientos de frío en la Región de Valparaíso. Presenta un gran tamaño, por lo que es común el uso de patrones enanizantes. Una de las características principales en su producción, es la utilización de insectos (generalmente abejas) para su correcta polinización. El árbol del cerezo es sensible a las altas temperaturas de verano y primavera, por lo que es usual que en el huerto se observe mallas en la zona superior de la canopia que cubren la plantación e impiden la incidencia directa de la radiación solar.

Existe una característica del cerezo que lo diferencia de otros carozos (durazno, damasco, nectarines), que es la temprana época de cosecha, esta particularidad incide directamente en el manejo del riego en este frutal. La particularidad en la fecha de cosecha, influye directamente en la programación del riego, ya que el crecimiento del fruto coincide con el crecimiento vegetativo, por lo que cualquier estrés hídrico en esta época es crítico.

Las principales variedades cultivadas en Chile son: Corazón de paloma, Bing, Lambert, Van y Early Bulat.

El cerezo es un frutal que varía más la ocurrencia de un estado fenológico por el clima que por una variedad. En la región de estudio se observa que en los huertos agrícolas existen diferencias de algunas semanas en los períodos fenológicos. Se registra que su ciclo vegetativo presenta una duración de 180 a 210 días.



**Figura 5.** Cerezo.

**Ciclo biológico:** Comenzando desde el receso invernal hasta la caída de hojas.

- Receso invernal: Estado de inactividad, frecuentemente observado a finales del mes de junio a principios de agosto en la región de estudio.
- Yema hinchada: Salida de la etapa de receso invernal, que ocurre a finales de agosto y los primeros días de septiembre.
- Floración: Apertura de las yemas florales y desarrollo de la flor a finales de septiembre culminando con la polinización y la caída de los pétalos a finales del mes de octubre.
- Maduración fruto: Comienza con el crecimiento del fruto y la posterior coloración de éste, finalizando con la cosecha del árbol para su consumo fresco. Esta etapa comienza en noviembre y termina con la cosecha en diciembre en la mayoría de las principales variedades de cerezo cultivadas en la región de estudio.
- Caída de hojas: Comienzo del receso invernal. Este proceso ocurre frecuentemente a finales del mes de abril y principios de mayo en un período de 3 semanas de duración.

## f) Manzano

**Nombre científico:** *Malus domestica*

**Características generales:** El Manzano es un frutal caducifolio perteneciente a la familia taxonómica *Rosaceae*, ampliamente distribuido en el mundo, en gran variedad de climas y suelos, pero en general es una planta adaptada más a climas fríos que cálidos. Se estima que en Chile se encuentran plantadas aproximadamente 45.000 hectáreas con manzano, de las cuales 35.000 hectáreas son de variedades rojas y 15.000 hectáreas de variedades verdes. En la región de estudio existen plantadas 10.000 hectáreas de variedades rojas y 5000 hectáreas de variedades verdes.

Es un árbol generalmente alto, por lo que es común su cultivo sobre portainjertos enanizantes que restringen su tamaño. En relación al riego, es un árbol con abundante y delgado follaje, por lo que en comparación con otros frutales, es un frutal que transpira bastante.

Existen numerosas variedades de manzano cultivadas en Chile, las más importantes son: Red Delicious, Granny Smith y Royal Gala.



**Figura 6.** Manzano.

**Ciclo biológico:**

- Yema hinchada: La reactivación del manzano ocurre frecuentemente en el mes de agosto, en donde se observa un hinchamiento de las yemas y un posterior brote de éstas en el mes de septiembre.
- Floración: Finales de septiembre a principios de octubre, aproximadamente 3 semanas de duración.
- Crecimiento de fruto a cosecha: Presenta un crecimiento de fruto relativamente lento. Los frutos comienzan su formación en octubre y en general la cosecha se da a inicios de febrero hasta marzo.
- Caída de hojas: junio.

### g) Peral

**Nombre científico:** *Pyrus communis* L.

**Características generales:** El peral es un árbol caducifolio que pertenece a la familia de las Rosáceas, originario de Europa central. Al igual que el Manzano, su fruto se describe como un pomo y ambos frutales se agrupan dentro de las Pomáceas. El clima ideal de este cultivo es un invierno con suficiente frío (requerimientos de horas-frío), pocas heladas tardías y primaveras y veranos con temperaturas no muy elevadas. Los marcos de plantación son muy variables ya que dependen de los patrones empleados, así como, de la poda o manejos particulares. Dentro de las principales variedades destacan Packams Triumph, Beurré Bosc y Du Comice.



**Figura 7.** Peral.

#### **Ciclo biológico:**

- Yema hinchada: La yema en el receso invernal se encuentra cubierta por estructuras protectoras (escamas). A finales de agosto, debido a la activación del crecimiento de la planta, las escamas se caen para, a mediados de septiembre, comenzar la brotación.

- Plena flor: Las yemas florales crecen progresivamente desde septiembre a mediados de octubre, simultáneamente las hojas enrolladas crecen hasta alcanzar la máxima cobertura a finales de octubre. Los primeros frutos comienzan a desarrollarse desde octubre.
- Cosecha: La cosecha en la región de estudio, se da desde enero hasta febrero.
- Caída de hojas: El receso invernal en el Peral comienza con una disminución de la actividad fotosintética y una pérdida del color verde de las hojas. Esta etapa se da desde el mes mayo a junio.

#### **h) Almendro**

**Nombre científico:** *Prunus dulcis*

**Características generales:** Frutal de hoja caduca perteneciente de la familia *Rosaceae* y del genero *Prunus*. El árbol que alcanza entre 3 a 5 metros de altura, posee yemas simples laterales (vegetativas y florales) especialmente en dardos con la característica que las yemas florales abren antes que las vegetativas. Es un frutal de zonas mediterráneas, tolera poco el frío. Es un árbol de floración muy temprana (julio-agosto), probablemente el más temprano en florecer, por lo que el riesgo de daño por heladas o lluvias en la zona central es muy alto.

La mayoría de las variedades provienen de EE.UU, siendo “Non Pareil” la más cultivada.



**Figura 8.** Almendro.

**Ciclo biológico:**

- Yema hinchada: La salida del receso invernal se reconoce por un crecimiento de las yemas latentes. Lo anterior, ocurre generalmente durante el mes de julio.
- Plena floración: Presenta una floración temprana, frecuentemente a mediados del mes de agosto, lo que representa un riesgo por posibles heladas que dañen esta estructura muy sensible a la temperatura.
- Fruto pequeño: El crecimiento del fruto comienza en el mes de septiembre hasta alcanzar su tamaño máximo a mediados de febrero.
- Cosecha: La cosecha del Almendro en algunas variedades se realiza en febrero y continúa hasta marzo a la primera semana de abril en variedades más tardías.
- Caída de hojas: Al ser el Almendro un árbol que presenta el desarrollo de su ciclo reproductivo antes que la mayoría de los árboles caducos, el receso invernal también tiene una ocurrencia temprana, generalmente en el mes de mayo.

### **i) Nogal**

**Nombre científico:** *Jungals regia L.*

**Características generales:** El nogal, es un árbol caduco muy vigoroso, de 24 a 27 m de altura y un tronco que puede alcanzar de 3 a 4 m de diámetro. Se reconoce como una especie monoica, es decir las inflorescencias masculinas y femeninas se encuentran separadas pero en el mismo árbol. Chile posee actualmente alrededor de 19.000 hectáreas plantadas con nogales. La fruta es una drupa de la cual lo que comemos es la semilla. Las variedades comerciales más utilizadas actualmente son Eureka, Chandler, Franquette y Serr.

Los Nogales al ser árboles de gran tamaño tienen una constante necesidad de agua durante todo su período de activo crecimiento. Esto se debe a su gran cobertura vegetativa y su gran potencial evapotranspiratorio. Dentro del ciclo son muy pocas las etapas en las cuales el árbol puede estar frente a un estrés hídrico sin causar problemas considerables en la producción.

El nogal como especie caduca tiene un periodo de reposo y un periodo de actividad vegetativa. Ambas etapas son condicionadas por la temperatura, siendo esta la responsable del desarrollo de las etapas del ciclo vegetativo anual de las plantas de origen de climas templados o templados cálidos.

Una característica importante del Nogal es que es un árbol con una marcada dominancia apical, es decir, que las yemas terminales o yemas punteras, son las que primero brotan y son las crecen más vigorosamente.



**Figura 9.** Nogal.

**Ciclo biológico:**

- **Brotación:** Como árbol caducifolio el Nogal tiene inhibidas las yemas hasta que se presenten las condiciones adecuadas para su crecimiento. El Nogal tiene dos tipos de yemas florales: masculinas (Botón lanoso) y femeninas, las cuales brotan junto

con las yemas vegetativas frecuentemente durante la segunda y tercera semana de septiembre, hasta las primeras semanas de octubre, generalmente de manera independiente y no sincronizada.

- Fruto pequeño: El crecimiento del fruto en el Nogal se registra durante las últimas 3 semanas de enero y se detiene hasta el momento de la cosecha.
- Cosecha: El tiempo de cosecha del Nogal coincide con la madurez fisiológica, la cual se reconoce en el campo por un cambio de color de la semilla a café. Esto ocurre en la región de estudio entre la última semana de abril y las primeras de mayo.

## 1.2 Cultivos hortícolas, cereales y pradera

La caracterización y descripción fenológica de cultivos hortícolas y praderas se presentan a continuación.

### a) Tomate

**Nombre científico:** *Lycopersicon esculentum* Mill.

**Características generales:** es una planta perenne de hábito arbustivo que puede desarrollarse en forma rastrera o semi-erecta. Pertenece a la familia taxonómica *Solanaceae* y es un cultivo que se ha desarrollado tradicionalmente en casi todo el territorio chileno. Las épocas de siembra tienen directa relación con el momento en el cual se quiere vender el producto, sin embargo, debido a la poca tolerancia a las heladas (en la mayoría de las variedades cultivadas) esta labor se debe realizar en verano, o bien, en otra época, pero a través de invernaderos con ambiente controlado en donde se puede completar el ciclo productivo en cualquier época del año.

El tomate, al tener una semilla pequeña, de difícil siembra automatizada en el campo, se hace germinar en almácigos, en donde se puede mantener un cuidado mayor de los primeros estados de la planta. Luego, la planta al presentar un tamaño adecuado, se trasplanta al sitio de producción donde completa su ciclo productivo.

La realización del cultivo del tomate en invernaderos influye directamente en la duración de las etapas fenológicas, ya que las temperaturas al interior de los invernaderos es mayor a la temperatura ambiente, por lo tanto, se acortan los ciclos de producción. Además, permite el cultivo en épocas invernales, ya que impide el daño por heladas.



**Figura 10.** Tomate.

**Ciclo biológico:**

- **Siembra/Germinación:** La siembra de almácigos de tomate se realiza generalmente en invernaderos o lugares apropiados para el cuidado de los plantines. La época de siembra se realiza desde mediados de agosto a octubre, dependiendo del momento en que se quiere llegar al mercado comercial.
- **Crecimiento vegetativo:** El crecimiento vegetativo se considera desde el momento en que se trasplanta el tomate al sitio de producción. Esto ocurre, dependiendo de la siembra, desde septiembre a noviembre hasta que comienza la floración en noviembre o diciembre
- **Floración/ Maduración del fruto:** Presenta una floración conjunta con la maduración de algunos frutos. Frecuentemente, dependiendo de las temperaturas, esto ocurre desde diciembre o enero para tener una cosecha estimada a finales de enero hasta marzo.

## b) Maíz

**Nombre científico:** *Zea mays*

**Características generales:** A nivel mundial, el cultivo del maíz es uno de los cultivos más importantes de la dieta del ser humano. Tradicionalmente, el cultivo del maíz ha estado enfocado a satisfacer necesidades de alimentación animal y humana, sin embargo, en los últimos años el cultivo del maíz también se produce para la elaboración de combustible vegetal.

El Maíz, presenta una notable respuesta tanto a la radiación solar incidente como a la temperatura, por lo tanto, la densidad óptima de plantas (plantas por hectáreas) es un factor importante que influye en el desarrollo del ciclo biológico y en el rendimiento del cultivo.

Debido a la gran distribución mundial, el Maíz debe ser uno de los cultivos más diversos y con mayor mejoramiento genético. Es una especie que en la actualidad se encuentra adaptada a múltiples condiciones climáticas y edáficas. En general, las variedades comerciales apuntan a alargar (tardías) o acortar (tempranas) el desarrollo del cultivo.

En el Maíz se pueden distinguir dos grandes períodos: el vegetativo y el reproductivo. El primero considera los estados de crecimiento inicial del cultivo y se determina por el número de hojas desde la germinación de la semilla. El período de reproducción comienza con la aparición de la panoja (inflorescencia) y termina con la madurez fisiológica de los frutos.

La ocurrencia y duración de los distintos estados fenológicos en el Maíz dependen directamente de la fecha de siembra del cultivo y del tipo de variedad sembrada (precoz, tardío o intermedio). Según el INE (2010), en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins aproximadamente el 70% de la siembra de Maíz se realiza entre los últimos días de julio hasta finales de septiembre, es decir, en el período inmediatamente después del término de las lluvias y heladas invernales. Es precisamente en este momento, que el clima (menor probabilidad de heladas) y el suelo (contenido adecuado de humedad) se encuentran óptimos para la siembra de este cultivo.



**Figura 11.** Maíz.

**Ciclo biológico:**

- Precoz: La siembra comienza a partir de la segunda semana de septiembre. El primer par de hojas se observan frecuentemente en la primera semana de octubre. El inicio del estado reproductivo se da en la segunda semana de noviembre. En tanto, la cosecha se realiza entre la última semana de diciembre a la primera semana de enero.
- Intermedio: La siembra se realiza a finales de agosto a los primeros días de septiembre, siendo la aparición del primer par de hojas la primera semana de

octubre. Plena flor tiene una ocurrencia frecuente última semana de noviembre. En tanto, la cosecha se realiza para las dos primeras semanas de febrero.

- Tardío: Como el ciclo es más largo la siembra de este grupo de variedades se realiza inmediatamente al terminar el período de lluvias, es decir entre agosto y septiembre. El primer par de hojas se observa en el mes de agosto. Plena flor en estas variedades se da las primeras semanas de diciembre y la cosecha a partir de las últimas semanas de febrero a las primeras de marzo.

### c) Cebolla

**Nombre científico:** *Allium cepa* L.

**Características generales:** Se trata de un cultivo bianual muy extendido por todo el mundo, pues hay un gran número de cultivares con distinta adaptación a los diferentes climas que existen y que influyen en el ciclo productivo del cultivo. Las variedades de cebolla son numerosas y presentan bulbos de diversas formas y colores, los cuales completan su ciclo en periodos diferentes.

Las hojas de la cebolla presentan dos morfologías distintas dentro de una misma planta. Las hojas aéreas, encargadas de la fotosíntesis de la planta son cilíndricas, terminadas en punta y huecas. En cambio, las hojas subterráneas se engruesan para formar el bulbo comestible, el cual es el órgano de almacenamiento de la planta.

Al presentar una semilla pequeña, que dificulta su siembra de manera automatizada, se realiza el cultivo a través de siembra de almácigos y posterior trasplante al sitio de producción. Generalmente, la siembra de almácigo se realiza en invernaderos de modo de controlar las condiciones de temperatura.

La cebolla es un cultivo que presenta fotoperiodo de día largo, es decir, que la formación del bulbo comestible, se debe originar a medida que las horas de luz aumentan (Julio a Diciembre). Las variedades precoces requieren 10 hrs de luz para comenzar y completar la bulbificación, en cambio las variedades tardías requieren de aproximadamente 13 hrs para lograr este proceso.



**Figura 12.** Cebolla.

**Ciclo biológico:**

- Germinación/Emergencia: Con la germinación de la semilla, se forma un tallo muy corto donde se insertan las raíces y las hojas. La siembra de la Cebolla se realiza entre los meses de junio a julio.
- Crecimiento del follaje: se observa un rápido crecimiento del follaje desde la germinación hasta la formación del bulbo (agosto a octubre).
- Formación del bulbo: Se inicia con la paralización del sistema vegetativo y la movilización y acumulación de las sustancias de reserva en la base de las hojas interiores, las cuales se engrosan y dan lugar al bulbo. Esta etapa es muy dependiente de la temperatura; a mayor temperatura menor duración del ciclo (septiembre a noviembre).
- Reposo vegetativo/cosecha: la planta detiene su desarrollo y el bulbo maduro se encuentra en latencia. La fecha estimada de cosecha es desde fines de febrero a fines de marzo.
- Floración: La cebolla requiere bajas temperaturas para inducir su floración, lo cual es un proceso no deseado en la producción comercial, ya que es un fenómeno que compite con el desarrollo del bulbo. Contrariamente, es un fenómeno buscado si la finalidad es la producción de semillas. Fecha estimada de ocurrencia: abril/mayo.

#### d) Alfalfa

**Nombre Científico:** *Medicago sativa* L.

**Características generales:** Planta forrajera perenne perteneciente a la familia taxonómica Fabaceae (Leguminosa), originaria del suroeste asiático. Presenta un sistema radical profundo, lo que la hace resistente a las sequías. Probablemente, es el cultivo forrajero más importante del mundo, debido a que se considera una de las plantas más alimenticias; es rica en proteínas, minerales y vitaminas. Se usa como acondicionador del suelo (mejora propiedades nutricionales del suelo) y como alimento para ganado vacuno, ovino y porcino, caballos y aves de corral. Las flores son también un alimento excelente para abejas melíferas, y se utiliza como aporte vitamínico en comidas preparadas. Con relación a la nutrición del cultivo, en condiciones óptimas, no debiese existir deficiencias de Nitrógeno (N), debido a que la Alfalfa obtiene el N por las bacterias ubicadas en sus raíces (nódulos).

El momento de la siembra debe ser decidido en función de las condiciones locales y de la experiencia del agricultor. Generalmente, al inicio de la primavera, o bien en un otoño benigno (con baja probabilidad de heladas), se realiza la siembra de la alfalfa.

Como regla general, el primer corte de la alfalfa debe ser cuando tiene entre un 25-50% de floración, de este modo no se disminuye la producción en cortes posteriores. Después de cada corte, la alfalfa, como todas las especies perennes, se debe recuperar energéticamente, ya que toda la producción de nuevos tallos, hojas y raíces proviene del almacenamiento de las raíces. Lo anterior, se debe respetar hasta el momento en que la planta pueda comenzar nuevamente a fotosintetizar energía para sus necesidades de crecimiento, lo que se logra con una altura de 20-25 cm.

La frecuencia de corte depende del ciclo natural de la alfalfa, considerando que la reserva de nutrientes, posterior al corte, debe ser suficiente para la correcta brotación del nuevo ciclo. De esta manera, los niveles de producción no disminuyen de un corte a otro.

Debido a lo anterior, se desprende que en una misma zona (o cuenca) se observen cultivos de alfalfa en distintos estados fenológicos, con distintas alturas y diferentes requerimientos hídricos.

**Ciclo biológico:** Al ser una planta de hábito perenne, la alfalfa presenta varios ciclos de crecimiento y floración durante una temporada. Estos ciclos de crecimientos dependen de la frecuencia del corte o pastoreo al que se le someta. Una vez removida la parte aérea comienza un nuevo crecimiento desde las yemas basales remanentes. Al no existir una fecha única para una zona en particular no se pueden determinar fechas estimativas de comienzo y término de un ciclo.



**Figura 13.** Alfalfa.

## **Anexo 4**

---

## 1 EFICIENCIA DEL RIEGO

En general, los métodos de riego se pueden clasificar en riegos tecnificados y riegos tradicionales.

El riego tradicional utiliza la gravedad para distribuir el agua en el predio agrícola y se obtienen eficiencias menores que en un riego tecnificado, debido a que el agua debe escurrir superficialmente por el suelo a lo largo de la hilera o cultivo, generando zonas sub-regadas y sobre-regadas. El riego tecnificado utiliza bombas de agua para presurizar el agua y distribuirlas a través del campo en cañerías, el agua no escurre a través del suelo si no que es incorporada al suelo de forma localizada.

### 1.1 Surcos

El riego por surcos (**Figura 1**) se adapta a cultivos sembrados en hileras como hortalizas, chacras, maíz y frutales en general. El agua fluye desde la fuente (canal de regadío), a través de las entre hileras en el sentido de la pendiente. Para usar este método se requiere de un suelo nivelado, de lo contrario el agua se aposa en los sectores bajos.



**Figura 1.** Riego por surco en Cebolla.

### 1.2 Tendido

Es el método de riego más ineficiente, consiste en dejar escurrir desde el punto de entrada de agua al predio hacia zonas más bajas de éste (**Figura 2**). La ineficiencia está dada principalmente por la topografía del predio, donde pueden quedar zonas sin aporte de agua y otras con exceso, produciéndose pérdidas de agua por percolación.



**Figura 2.** Riego por tendido.

### 1.3 Goteo

El riego por goteo se caracteriza por ser un riego localizado de alta frecuencia (**Figura 3**). El método debe suplir sólo el consumo de agua de la planta de manera individual, considerando la demanda evapotranspirativa y el contenido de agua del suelo. Presenta una alta eficiencia (máximo de 90%), debido a que se disminuyen casi por completo, pérdidas por escurrimiento y percolación de agua.



**Figura 3.** Riego por goteo en cítricos.

### 1.4 Microaspersión

Consiste en aplicar el agua de forma localizada, en un radio no mayor a 3 metros, asimilando el efecto de un rocío, es decir, pequeñas gotas (**Figura 4**). Es una mezcla entre el método de riego por goteo y aspersión.



**Figura 4.** Riego por microaspersión.

### 1.5 Pivote

Los sistemas de riego por pivote central son un tipo de dispositivo móvil de riego por aspersión y su mayor diferenciación es que riegan superficies de grandes dimensiones de forma circular o semicircular (**Figura 5**). Es un sistema que se adapta a la topografía del terreno; no requiere, en la mayoría de los casos, nivelación del suelo.



**Figura 5.** Riego por Pivote en Maíz.

## **Anexo 5**

---

## FICHA DE CAMPO

Ficha N° \_\_\_\_\_

### CONTROL GEODÉSICO

|                      |  |
|----------------------|--|
| Equipo & Modelo      |  |
| Sist. Coord. y Datum |  |
| Fotografía N°        |  |
| Este                 |  |
| Norte                |  |
| Altura Elip.         |  |
| Azimet Orientación   |  |
| Distancia Cultivo    |  |

### Monografía

### SISTEMAS DE RIEGO

| Riego gravitacional | Mecánico mayor        | Microriego                |
|---------------------|-----------------------|---------------------------|
| Tendido             | Surco                 | Otro tradicional          |
|                     | Aspersión tradicional | Carrete o pivote          |
|                     |                       | goteo y cinta             |
|                     |                       | Microaspersión y microjet |

### USO DE SUELO Y GRUPOS DE CULTIVO, PLANTACIONES Y BOSQUE

| Uso de suelo                                                      | Cereales               | Leguminosas y tubérculos | Cultivos industriales     | Hortalizas                   | Flores      | Plantas forrajeras   | Frutales            | Viñas y parronales        | Semilleros         | Plantaciones forestales | Viveros | BOSQUE NATIVO TIPOS     |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------|----------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|-------------------------|---------|-------------------------|
| Terrenos estériles (arenales, pedregales, En barbecho y descanso) | Trigo blanco           | Papa                     | Raps (Canola)             | Alcachofa                    | Aleli       | FORRAJERA S. ANUALES | Almendro            | Tintas viníferas          | Maravilla          | Alamo                   | Viveros | Alerce                  |
| Praderas mejoradas y naturales                                    | Trigo candeal          | Poroto de exportación    | Lupino australiano        | Espárrago                    | Clavel      | Avena forrajera sola | Arándano            | Tintas viníferas          | Soya o Poroto soya | Aromo                   |         | Araucaria               |
| Matorrales                                                        | Cebada cervecera       | Poroto consumo           | Lupino amargo             | Orégano                      | Crisantemos | Avena forrajera      | Cerezo              | Blancas viníferas         |                    | Eucaliptus nitens       |         | Ciprés de las Guaitecas |
| Invernaderos                                                      | Cebada forrajera       | Lenteja                  | Lupino dulce (Grano Seco) | Apio                         | Gladiolo    | Otras mezclas de     | Ciruelo europeo     | Blancas viníferas         |                    | Eucaliptus globulus     |         | Ciprés de la Cordillera |
| Infraestructura (construcciones, Detalle: _____)                  | Avena (grano seco)     | Garbanzo                 | Remolacha azucarera       | Ajo                          | Lilium      | Ballicas anuales     | Ciruelo japonés     | Pisqueras (sólo regiones) |                    | Pino radiata (insigne)  |         | Coigue de Magallanes    |
|                                                                   | Centeno (grano seco)   | Arveja (grano seco)      | Tabaco                    | Arveja verde                 | Peonía      | Col forrajera        | Chirimoyo           |                           |                    | Pino oregón             |         | Coigue-raulitepa        |
|                                                                   | Maíz (grano seco)      | Chicharo                 | Curagüilla (Rama)         | Cebolla temprana             | Reina Luisa | Lupino forrajero     | Clementina          |                           |                    | Rauli                   |         | Esclerófilo             |
|                                                                   | Arroz (con cáscara)    |                          | Tomate industrial         | Cebolla de guarda            | Tulipán     | Maíz para silo       | Damasco             |                           |                    | Coigue                  |         | Lenga                   |
|                                                                   | Triticale (grano seco) |                          | Achicoria industrial      | Choclo                       |             | Trébol para silo     | Duraznero consumo   |                           |                    | Roble                   |         | Roble-Hualo             |
|                                                                   | Quinoa                 |                          |                           | Coliflor                     |             | Trébol alejandrino   | Duraznero tipo      |                           |                    | Tamarugo                |         | Roble-raulicoigue       |
|                                                                   | Alpiste                |                          |                           | Haba                         |             | FORRAJERA S          | Kiwi                |                           |                    | Plantaciones mixtas     |         | Siempreverde            |
|                                                                   |                        |                          |                           | Lechuga                      |             | Alfalfa              | Frambuesa           |                           |                    |                         |         | Palma chilena           |
|                                                                   |                        |                          |                           | Melón                        |             | Atriplex nomularia   | Frutilla            |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Pimiento                     |             | Ballica inglesa o    | Limonero            |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Poroto granado               |             | Trébol rosado        | Manzano rojo        |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Poroto verde                 |             | Mezcla de forrajeras | Manzano verde       |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Repollo                      |             |                      | Naranja             |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Sandía                       |             |                      | Nectarino (pelados) |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Tomate consumo               |             |                      | Nogal               |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Zapallito italiano           |             |                      | Olivo               |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           | Zapallo temprano y Zanahoria |             |                      | Palto               |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           |                              |             |                      | Peral europeo       |                           |                    |                         |         |                         |
|                                                                   |                        |                          |                           |                              |             |                      | Uva de mesa         |                           |                    |                         |         |                         |

### OBSERVACIONES

## **Anexo 6**

---

## 1 SUELOS

El suelo es el resultado de la acción acumulada de los flujos de energía y materia a partir de un material de origen, procesos que tienen como efecto la transformación progresiva de los materiales de partida en constituyentes secundarios. Los factores que afectan esta transformación del material de partida son: el clima, los organismos vivos, el relieve, el material parental y el tiempo.

Considerando los factores de formación antes mencionados, se deduce que los suelos de Chile, y en particular de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, son extremadamente variables, debido a la gran variedad de materiales parentales y climas existentes en el territorio. Estas variaciones de suelo pueden ser observadas tanto a escalas pequeñas (cuencas) como incluso en algunas zonas a escala predial (escalas grandes).

Desde el punto de vista geomorfológico la cuenca se encuentra flanqueada hacia el oriente por la pre-Cordillera de Los Andes y hacia el poniente por los cerros de la Cordillera de la Costa, que se orientan en dirección NE-SW (IGM,1983). En el valle se presenta un relieve plano hasta moderadamente ondulado, con un ancho estimado de 40 km. En la zona poniente de la cuenca del río Claro, perteneciente a la Comuna de Quinta Tilcoco y sus alrededores, se forma un sector encajonado por los cerros La Mocha en el norte y cerro Corcolén en el sur. Es en este lugar donde se observan las menores alturas y pendientes de la cuenca, por ende, es una zona de depositación de sedimentos y acumulación de aguas.

La erosión de la Cordillera de los Andes, ya sea debido a glaciares, lahares, o bien, a través del arrastre de sedimentos aluvionales, fueron depositados preferentemente en la Depresión Intermedia. Estos procesos, desgastaron la montaña, disminuyendo su altura y, permitieron conformar el relleno actual de los valles, siendo estos sedimentos los materiales de partida (material parental) de la mayor parte de los suelos de este sector.

La variabilidad natural de los suelos en la zona de estudio presenta ciertas dificultades a la hora de extraer información a través de la teledetección. La información captada por los sensores remotos, es una mezcla de información del continuo atmósfera-plantas-suelo. En especial, para las etapas tempranas de un cultivo, la información que predomina es suelo-vegetación, debido a la menor cobertura de la canopia en los estados iniciales (brotación, siembra). En este sentido, cambios notorios en las propiedades, que dicen relación con las características ópticas de los suelos, sobre todo el color (dependiente del contenido de materia orgánica y material parental) y la humedad del suelo, generan cambios en las firmas espectrales para un mismo cultivo.

El comportamiento espectral de los suelos se considera uniforme, es decir, muestra una curva plana con escasa variación en la reflectancia. Posibles variaciones en la respuesta espectral del suelo se deben principalmente a la humedad del suelo, contenido de materia orgánica y tipo de material parental. Con el aumento de la humedad superficial del suelo

la reflectancia disminuye, debido a la capacidad de absorción del agua retenida en el suelo. Por otra parte, la materia orgánica por ser un material opaco provoca una disminución en la intensidad de la energía reflejada.

En términos generales, el material parental en los suelos es uno de los factores más importante en el suelo, ya que influye directamente en las características ópticas del suelo. Por ejemplo, suelos calcáreos tienden a reflejar más energía en las bandas visibles debido a su color blanco mientras que materiales graníticos tienden a generar suelos de colores rojizos. Suelos de origen orgánico y desarrollado a partir de sedimentos lacustres, se caracterizan por presentar elevados contenidos de materia orgánica y ser de colores predominantemente oscuros.

Debido a todo lo anterior, se realizó una revisión bibliográfica de los suelos distribuidos en la cuenca del río Claro.

Según Luzio (2010), los suelos en la cuenca del río Claro de Rengo se pueden clasificar según la posición geomorfológica que ocupan; en suelos originados en terrazas aluviales, en piedmonts y suelos en cuencas de sedimentación lacustre.

- **Terrazas aluviales**

Son suelos que se encuentran asociados a los cauces de ríos actuales y esteros de menor importancia, que poseen gradientes de pendiente muy suaves o poseen una topografía plana, con pendientes que varían entre 1 y 2%. En general, el sustrato está constituido por gravas redondeadas de tamaño variable y en cantidad variable. El contenido de materia orgánica (MO) es particularmente bajo en la mayoría de los suelos de este grupo (1,5 y 2,5%). Tanto en superficie como en profundidad dominan los colores pardos y pardo oscuro (matices 7.5YR y 10YR). En algunos suelos donde se observa influencia de materiales graníticos (generalmente asociados al arrastre de sedimentos de la Cordillera de la Costa) se pueden tener colores pardos rojizos matices 5YR.

Las Series de suelo pertenecientes a este grupo en la cuenca son: Cachapoal, Olivar y O'Higgins.

- **Piedmonts**

Estos suelos ocupan planos inclinados, correspondientes a coluvios y piedmonts, de pendientes moderadas, en una posición intermedia entre los cerros más escarpados y los suelos de los valles aluviales. Las pendientes más frecuentes son de 1 a 3%, de 2 a 5% hasta de 3 a 8%. La MO alcanza 2,5% como máximo en suelos cultivados; en suelos ubicados bajo árboles nativos este valor aumenta (4 a 5%). En superficie los colores varían entre el pardo oscuro y pardo rojizo en los matices 7.5YR y 5YR.

Se distinguen las siguientes Series y Asociaciones en la cuenca: Asociación La Lajuela y Sierra Bellavista y, las Series Larmahue y Pimpinela

### - Sedimentación lacustre

Los suelos que se encuentran en esta posición ocupan las partes más deprimidas del paisaje, ya sean planos de inundación, cuencas de sedimentación, o bien, terrazas aluviales antiguas en las posiciones más bajas del paisaje. Se trata de suelos que presentan una topografía plana (0-1%). Asociada a los mecanismos de depositación de los sedimentos, la composición granulométrica de los suelos está dominada por clases texturales finas, esto es arcillosa o arcillo limosa. La mayoría de los suelos tiene colores pardo, pardo grisáceo, pardo oscuro, gris oscuro y negro en el matiz 10YR. La MO no es particularmente elevada en los horizontes superficiales, varía entre 1,5 y 4,0% en general.

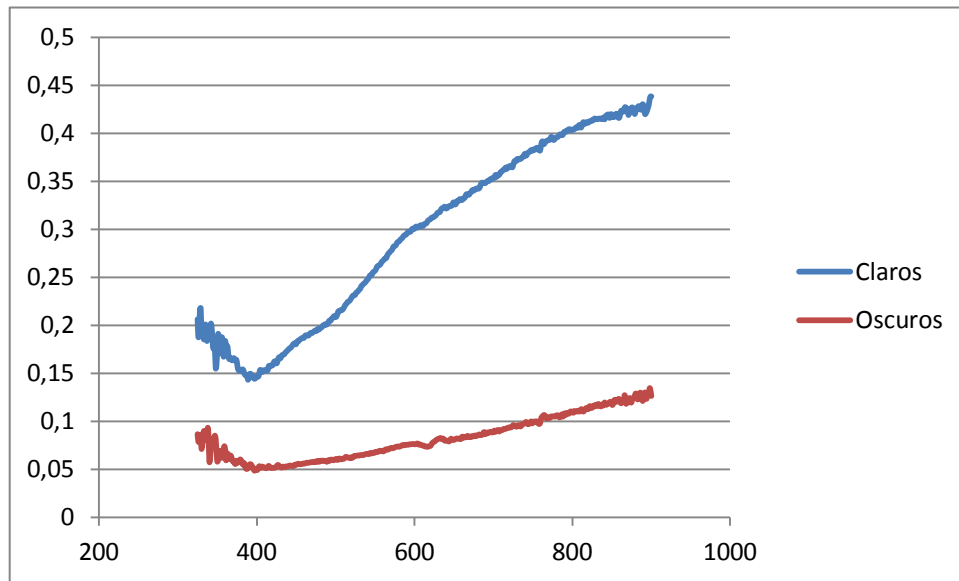
Las series de suelo ubicadas en este grupo son: Malloa, Misceláneo Vega, Rancagua y San Vicente.



**Figura 1.** Tipos de suelo.

Observando las características edáficas de la cuenca, tanto en terreno como la información bibliográfica, se decidió realizar una evaluación de la reflectancia de los suelos, con el objetivo de determinar la influencia que tienen los distintos colores superficiales en la identificación de cultivos a través de la teledetección.

La evaluación de la reflectancia de suelos en la cuenca de estudio, consistió en ir a las zonas donde se observó una gran diferencia en el color superficial del suelo y medir la reflectancia a través de un espectralímetro de mano.



**Figura 2.** Reflectancia de suelos claros y oscuros.

Como se observa en la **Figura 2**, la reflectancia en suelos de colores claros es bastante más elevada que la registrada en suelos de colores oscuros. La mayor variación se observa en la longitud de onda 900 en donde se registra aproximadamente un 60% de diferencia.

La reflectancia obtenida para los distintos grupos de suelos, se puede manifestar en una variación considerable tanto para la firma temporal como para la firma espectral, especialmente en los cultivos que tienen un espaciamiento entre y sobre hileras considerable (ej: Viñas, Cebollas, etc.). Los cultivos establecidos en los suelos oscuros debiesen presentar una firma con una menor intensidad, debido al color opaco del suelo. En cambio, los cultivos establecidos en suelos pertenecientes al grupo de suelos de colores claros, debiesen aumentar la intensidad de las firmas obtenidas.