



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

RESUMEN EJECUTIVO

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 RESUMEN EJECUTIVO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	3
2.1	OBJETIVO GENERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	REVISIÓN DE ANTECEDENTES	4
3.1	UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO	4
3.2	RELIEVE	4
3.3	RECURSOS HÍDRICOS Y RIEGO	4
3.3.1	RÍO CLARO DE RENGO	5
3.3.2	RÍO CACHAPOAL	5
3.3.3	OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA EN LA ZONA DE ESTUDIO	6
3.4	REFLECTANCIA DE CULTIVOS	9
3.5	NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS CULTIVOS	11
3.5.1	EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE REFERENCIA (ET_0)	11
3.5.2	COEFICIENTE DE CULTIVO (K_c)	11
3.5.3	EVAPOTRANSPIRACIÓN DE UN CULTIVO BAJO CONDICIONES ESTÁNDAR (ETC)	12
3.5.4	EFICIENCIA DEL RIEGO	12
4	METODOLOGÍA DE TRABAJO	13
4.1	ENFOQUE MULTIESPECTRAL TEMPORAL CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT	13
4.2	ENFOQUE HIPERESPECTRAL ESPACIAL CON IMAGEN AEROTRANSPORTADA	15
4.2.1	LEVANTAMIENTO CONDICIÓN ESCENA 1 Y 2	16
4.2.2	CORRECCIÓN DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES	16
4.2.2.1	Corrección Radiométrica	17
4.2.2.2	Corrección Geométrica	17
4.2.2.3	Corrección Iluminación	17
4.3	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE CAMPO	17
4.3.1	LEVANTAMIENTO RADIOMÉTRICO	18
4.3.2	LEVANTAMIENTO DE REFLECTANCIA DE CONTROL	18
4.4	USO DE INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA	18



4.5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.6	MODELO DE CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE CULTIVOS	19
4.7	ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE BAJO RIEGO Y ÁREAS CULTIVADAS POR TIPO DE CULTIVO	19
4.8	ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR TIPO DE CULTIVO	19
5	<u>ANÁLISIS Y RESULTADOS</u>	20
5.1	MODELO DE CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE CULTIVOS	20
5.2	ESTIMACIÓN DE ÁREA Y TIPOS DE CULTIVO	22
5.3	ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR TIPO DE CULTIVO	23
5.3.1	ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR ÁREA DE ESTUDIO	23
5.3.2	ESTIMACIÓN DE DEMANDA HÍDRICA POR SECCIÓN DE RIEGO	26
5.3.2.1	Sección N°1 del río Cachapoal	29
5.3.2.2	Sección N°1 y N°2 del río Claro de Rengo	32
5.3.3	ÍNDICES VEGETACIONALES	36
6	<u>CONCLUSIONES</u>	38

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. 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, 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 realizado el presente 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 km², 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).

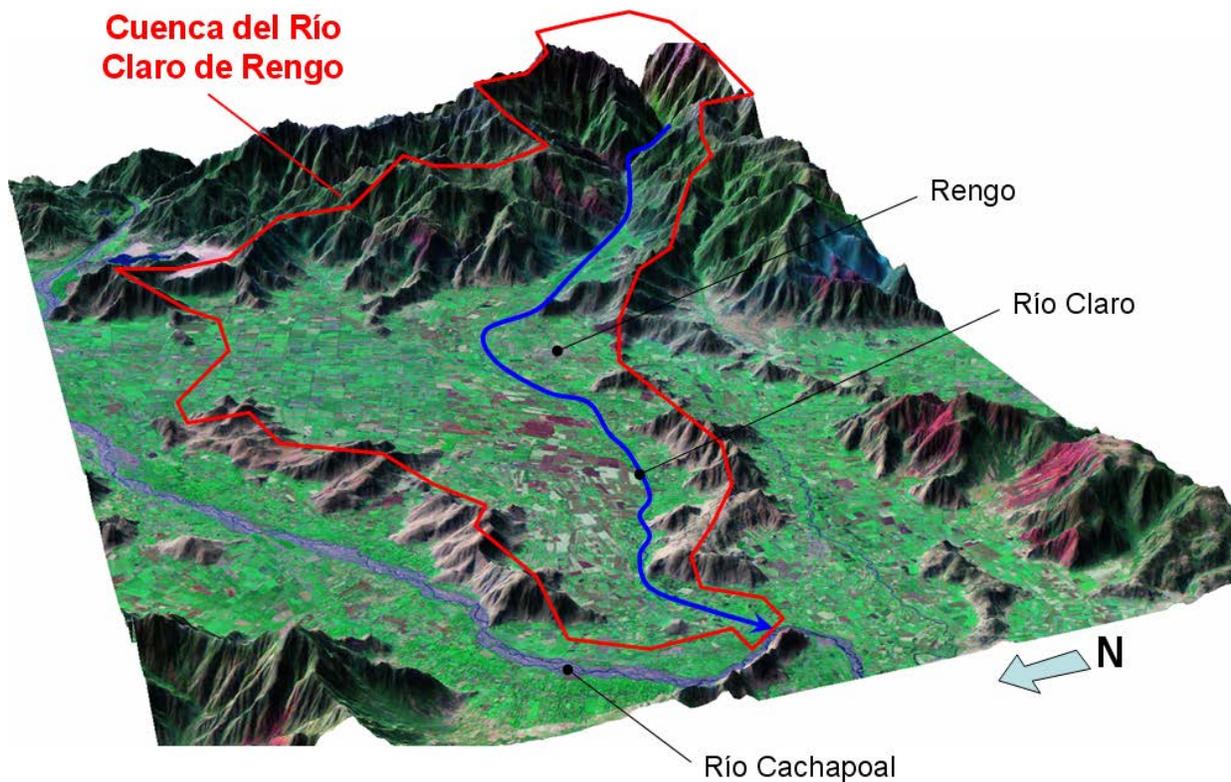


Figura 1.1. Área de estudio, cuenca del río Claro de Rengo.

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. Utiliza las propiedades ópticas de los objetos observados. 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.

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.

2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 Objetivo General

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 km² (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).

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. 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).

3.3 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 km² 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 m³ 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.

3.3.1 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 km² (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 2^{da} 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 km² (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 2^{da} 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.

3.3.2 Río Cachapoal

El río Cachapoal drena una superficie de 6.730 km² 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 km².
- 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 km².
- 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 km².

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.

3.3.3 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 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 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	11,18	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^{da} 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.

- i. Demanda agrícola de la cuenca, el cual consiste en definir una demanda a partir de cálculos teóricos de la tasa de riego.
- ii. 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:

- i. 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.
- ii. 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 ^a 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 ^{da} 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 ^a 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 ^{da} 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 m³/s
- Río Cachapoal, 2ª Sección: 130,31 m³/s
- Río Claro, 1ª Sección: 25,65 m³/s
- Río Claro, 2ª Sección: 44,16 m³/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 hm³, 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 hm³, 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 hm³, 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 hm³, 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., presentando 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.

3.4 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 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.

Los factores importantes que influyen en la reflectancia de una cobertura vegetal tienen directa relación con la estructura de la planta: 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.

Por otra parte, el comportamiento de la reflectancia de los cultivos bajo condiciones de estrés (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.

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.

3.5 Necesidades hídricas de los cultivos

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 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: respiración y fotosíntesis. Por lo anterior, la demanda debe ser suplida a través de aportes hídricos naturales (precipitaciones) o 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 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.

3.5.1 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, 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.

3.5.2 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, integrando 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.

Dependiendo del estado fenológico de un cultivo, éste adapta sus requerimientos para optimizar los recursos de radiación, agua y nutrientes. Durante las primeras etapas, la evapotranspiración se debe principalmente a la evaporación del suelo. En estas condiciones de poca cobertura de vegetación el $K_{c,ini}$ está determinado principalmente por el contenido de agua que presenta 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 y sombrea cada vez más el suelo, 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).

3.5.3 Evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

Es la evapotranspiración de una cubierta vegetal de un cultivo libre de enfermedades bajo condiciones óptimas de suministro de agua, con adecuado aporte de nutrientes, de tal forma que obtenga la máxima producción bajo las condiciones climáticas dadas por ET_0 y se calcula por la relación:

$$ET_c = K_c * ET_0$$

La tasa de ET_c en un predio agrícola está influenciada por las prácticas de manejo particulares de la producción agropecuaria. Estos manejos 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, 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 debido a la variación de la demanda evapotranspirativa de la atmósfera y a los cambios propios del cultivo o fenología.

3.5.4 Eficiencia del riego

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).

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

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

El siguiente diagrama muestra la metodología de trabajo que se llevó a cabo para abordar el estudio.

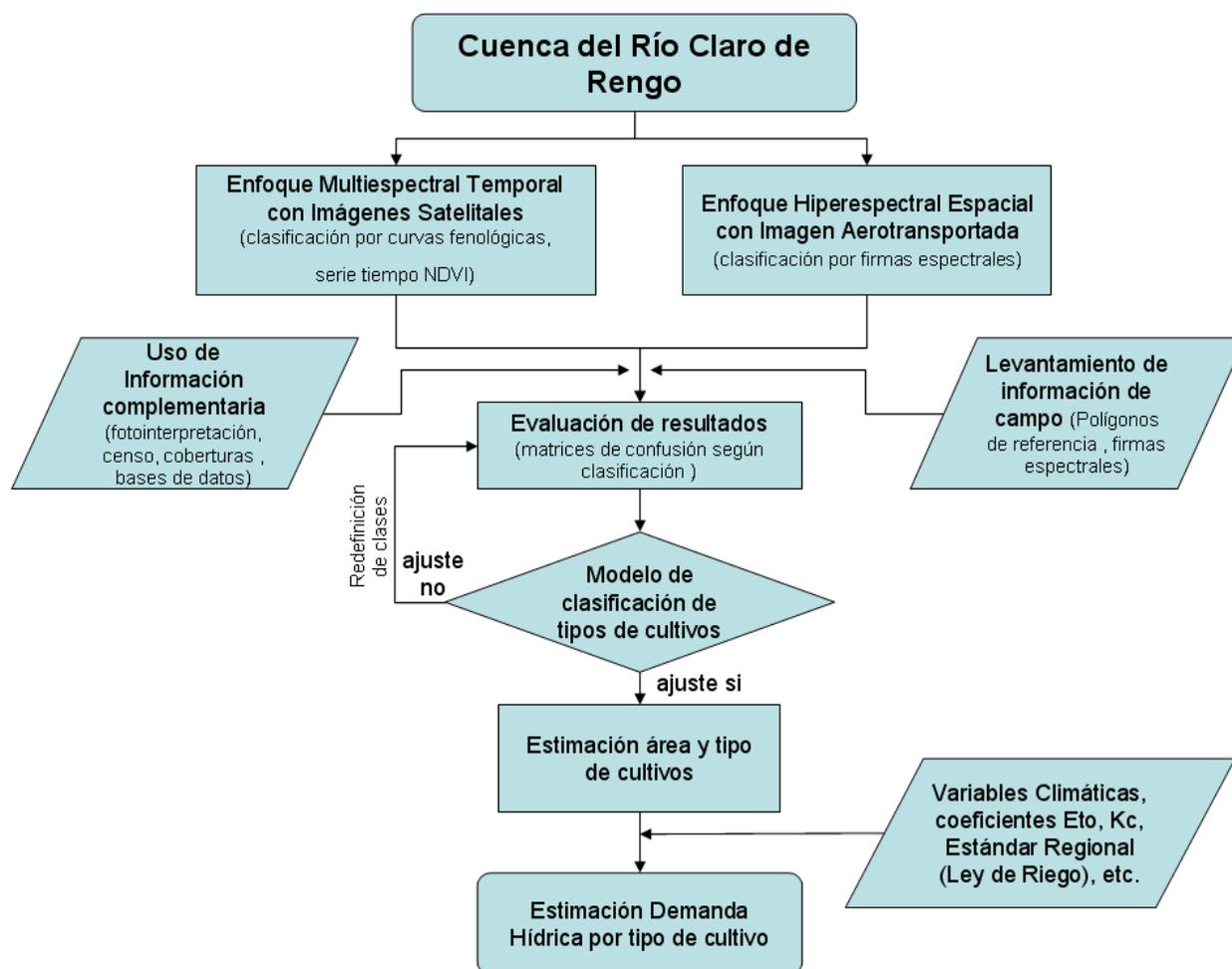


Figura 4.1. Diagrama de la metodología de trabajo.

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.

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 particular para el enfoque multiespectral, 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.

Dentro del procesamiento digital de las imágenes satelitales, se realizaron una serie de correcciones tendientes a mejorar los errores sistemáticos del sensor. 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. Para esto, se aplicó el método FLAASH, ya que permitió reducir la radiancia añadida a los píxeles de cada banda (Peña, 2007).

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 4.2**). 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.

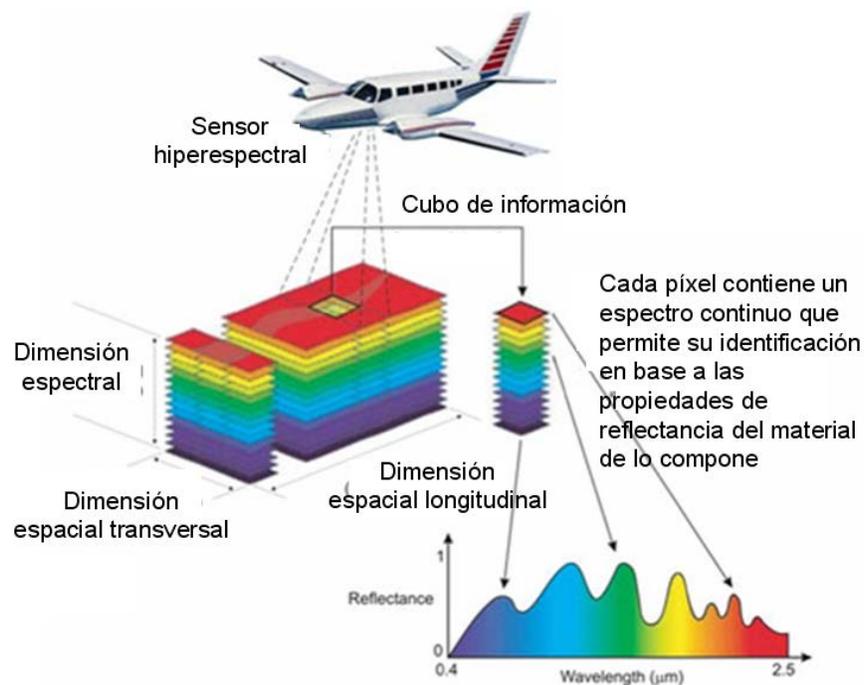


Figura 4.2. Esquema de adquisición de información hiperespectral (Fuente: modificado de <http://www.csiro.au>).

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. Adicional, se exploró el reconocimiento de aspectos ecofisiológicos de los principales cultivos, por medio de la aplicación de índices vegetacionales avanzados que permitirían 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

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. 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.

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 geoméricamente 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.

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 que existe una incompatibilidad de horario y de la ubicación del sol, lo cual se corrigió programando en el software MATLAB, los valores de cada línea en función de los horarios, posición o azimut del sol y radiancia teórica.

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 multispectrales 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. Se levantaron un total de 257 polígonos de control los que se registraron en fichas individuales.

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

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. 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.

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: 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.

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 Modelo de Clasificación de Tipos de Cultivos

Las imágenes hiperespectrales 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.

Con la disponibilidad de imágenes obtenidas, se trabajó con aplicaciones estadísticas (MNF, PCA) para extraer la información más relevante de cada firma temporal. 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.

4.6 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.

4.7 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, se realizó considerando la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), la cual se determinó a partir de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), según la siguiente expresión:

$$ET_c = ET_0 * K_c$$

- Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0).

- Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ETc).

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

$$\text{Demanda Hídrica (m}^3 \text{ há}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{ET}_0 * \text{Kc})}{\text{Eff}}$$

Conociendo el área que cada cultivo o grupo de cultivos ocupa en la cuenca estudiada, 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. A continuación se presenta resumidamente la clasificación con el método hiperespectral de las especies que presentan mayor separabilidad y la clasificación de la información restante, por medio de clasificación multitemporal por comportamiento fenológico.

5.1 Modelo de Clasificación de Tipos de Cultivos

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 incluyó 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, para lo cual 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, ya que correspondieron a los cultivos 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 5.1**. El resultado de esta clasificación es presentado en el **Plano N°5**.

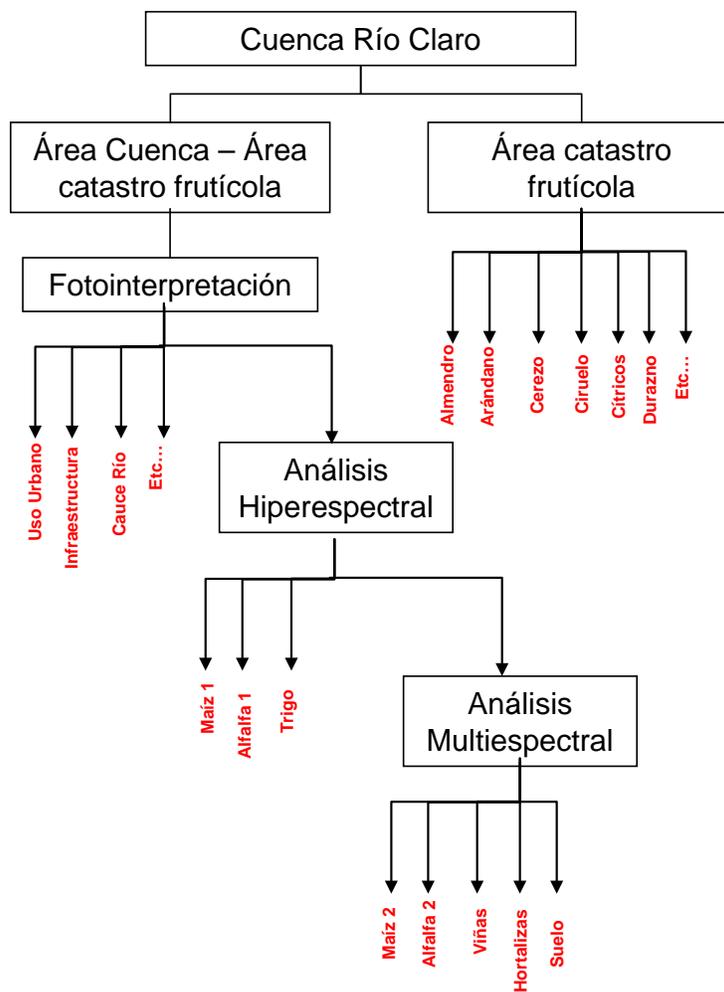


Figura 5.1. Esquema de clasificación complementaria con uso de imágenes hiperspectrales y multiespectrales.

5.2 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 12.018 ha son 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 16,7% a suelo desnudo. El detalle de la distribución de estas áreas se muestra en la **Figura 5.2** y en el **Cuadro 5.1**.

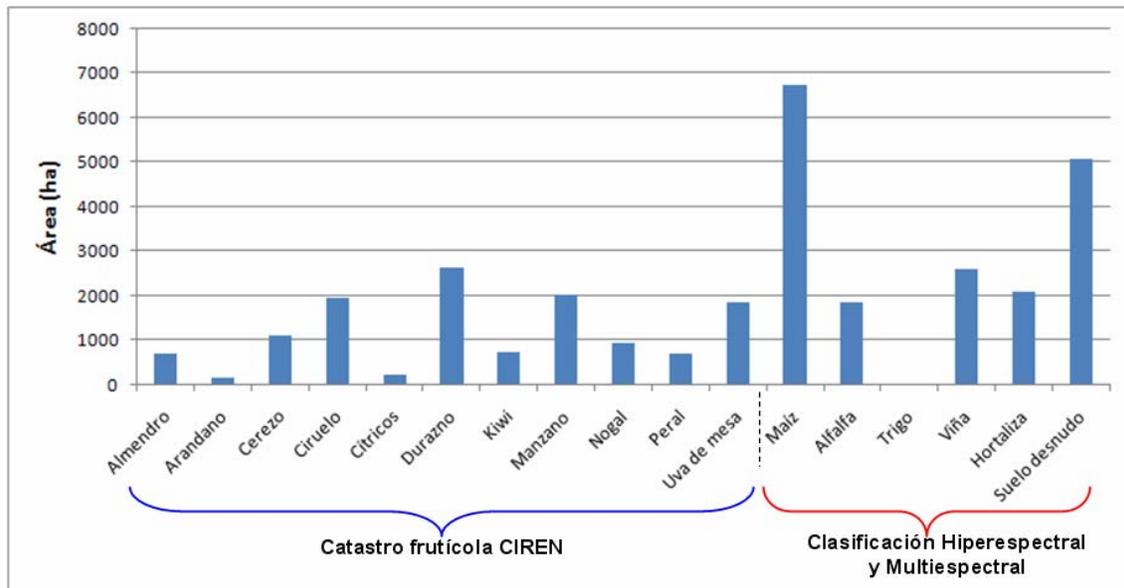


Figura 5.2. Superficie en hectáreas de los cultivos en la cuenca del río Claro.

Cuadro 5.1. 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%
TOTAL	30401.8	100.0%

5.3 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.

5.3.1 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 5.2** 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 5.2. 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%
TOTAL	42420		641973.5			3552387.2	
Caudal equivalente* (m^3/s)			7.4			41.1	

* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m^3/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 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.

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 m³ 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 m³ha⁻¹dia⁻¹), 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.

Con lo anterior, se concluyó 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.

5.3.2 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 5.3**, 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.

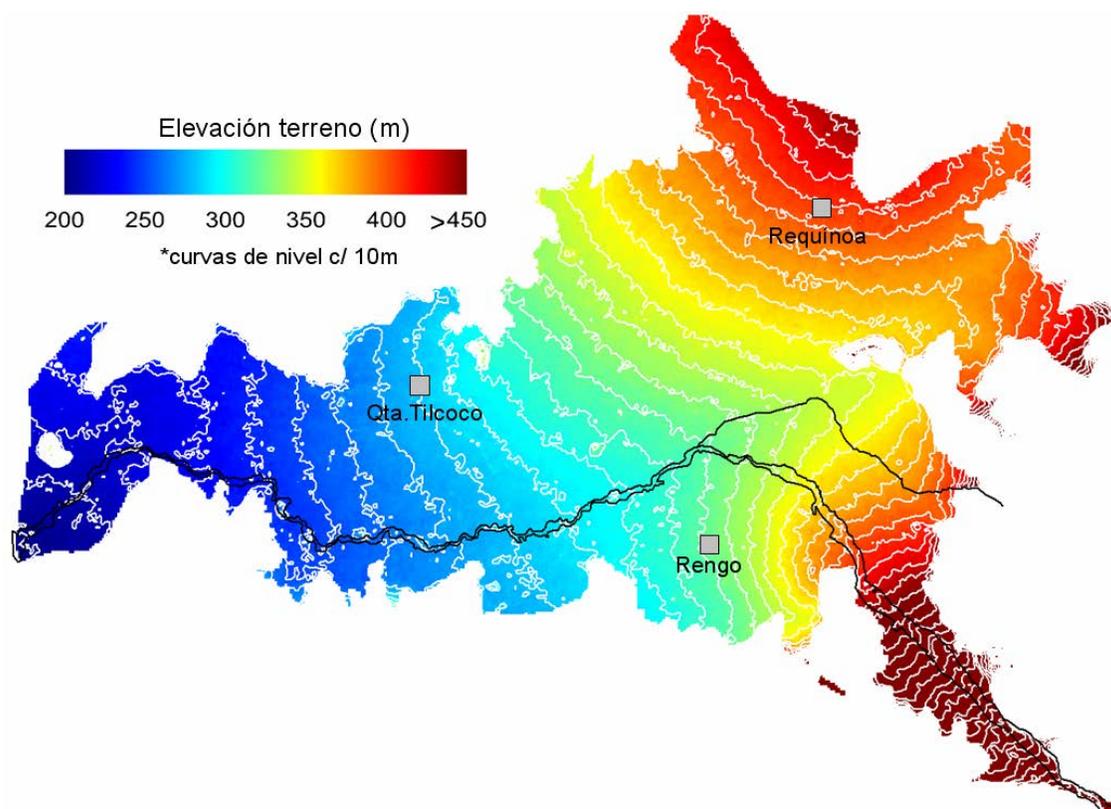


Figura 5.3. Topografía en la cuenca hidrográfica del río Claro. Base DEM SRTM (NASA, 2000).

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 5.4** se muestra la red de canales de riego en la cuenca hidrográfica del río Claro.

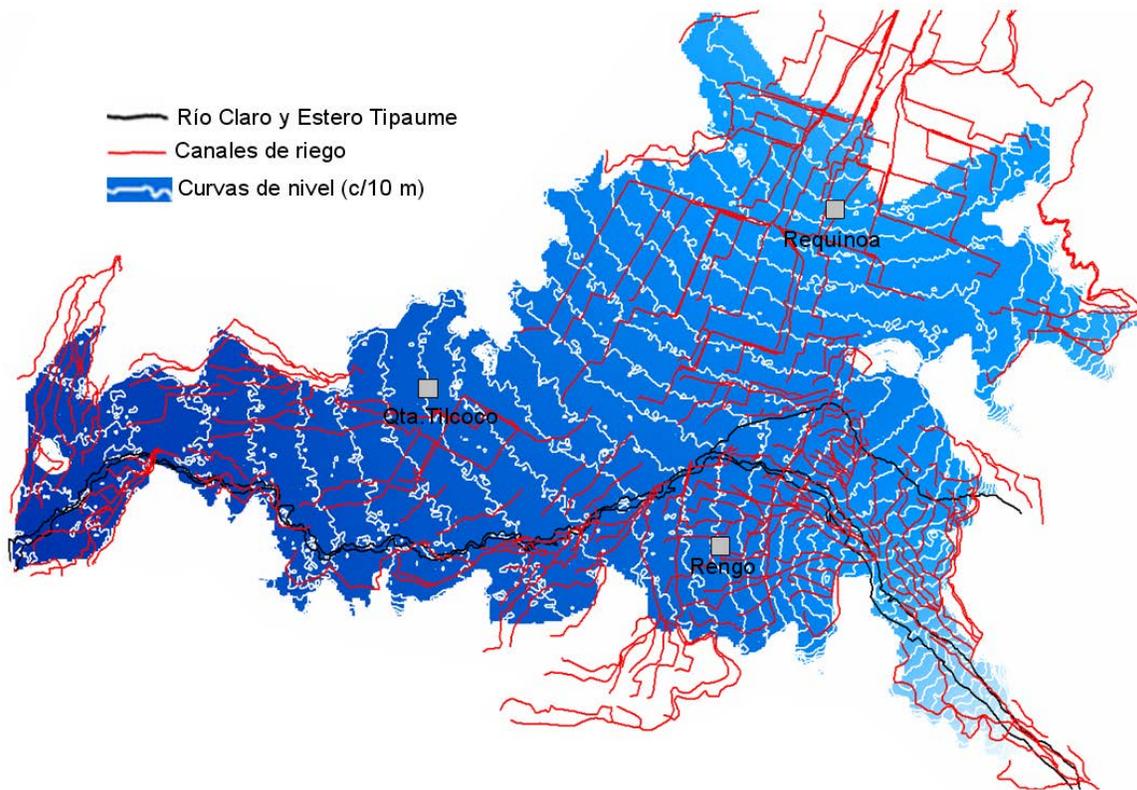


Figura 5.4. Red de canales de riego en la cuenca hidrográfica del río Claro.

Las secciones de riego que abarca el área de estudio son tres (**Figura 5.5**): 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^{era} 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 Km²). En tanto que la 2^{da} Sección del río Claro abarca desde el puente La Chimba hasta la confluencia con el río Cachapoal (506 Km²).

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 permitió 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 5.5** se observa 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.

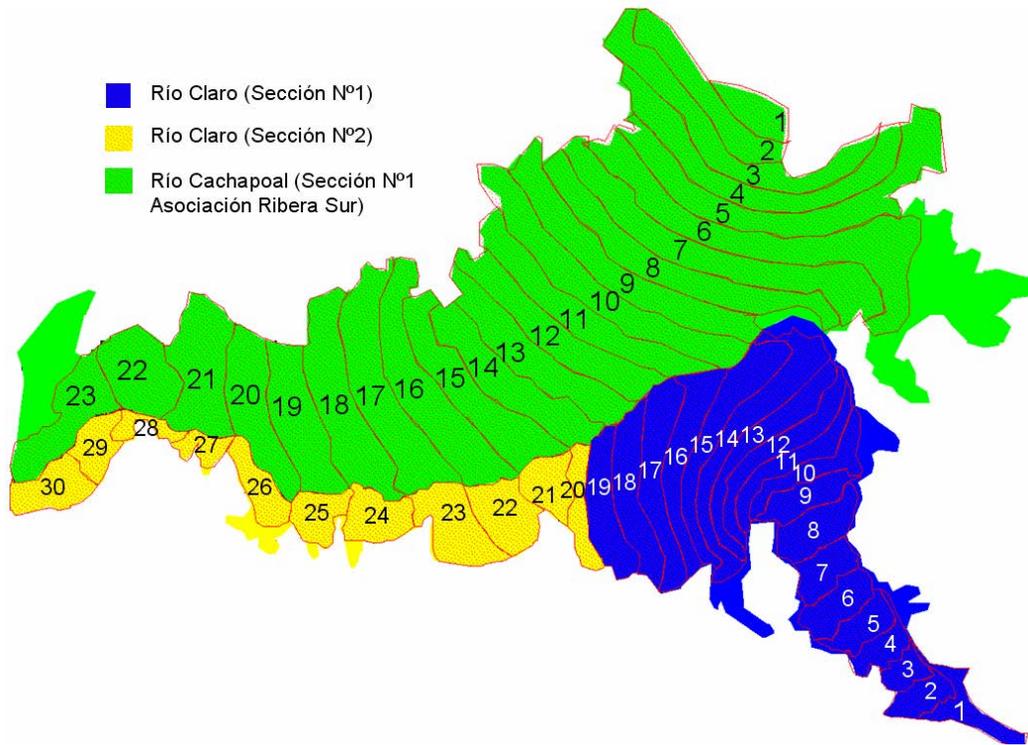


Figura 5.5. Distribución espacial de las secciones de riego en la cuenca del río Claro.

5.3.2.1 Sección N°1 del río Cachapoal

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

Como se observa en la **Figura 5.6**, 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 del área de estudio, Maíz (Grupo Cereales+Forrajeras).

Se observó un punto de inflexión en la división 13 en donde se igualan los rubros de cultivos frutales y Cereales+Forrajeras. En este lugar se observó en terreno un cambio notorio en el suelo que restringe la producción de frutales (**Anexo N°6**). Las particularidades del suelo que provocan una disminución de la superficie de los frutales son la profundidad del nivel freático y la dominancia de texturas finas (suelos arcillosos).

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+Forrajeras y el aumento de Grupo Hortalizas.

En el caso de la sección N°1 del río Cachapoal Ribera Sur, se obtuvo una demanda equivalente a 5,3 m³/s en el período inicial y 29,1 m³/s en el período de demanda máxima (**Cuadro 5.3**). Cabe señalar, que este caudal equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en m³/s y no considera la eficiencia de conducción. Los resultados muestran que los tipos de cultivos que requieren mayor agua 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.

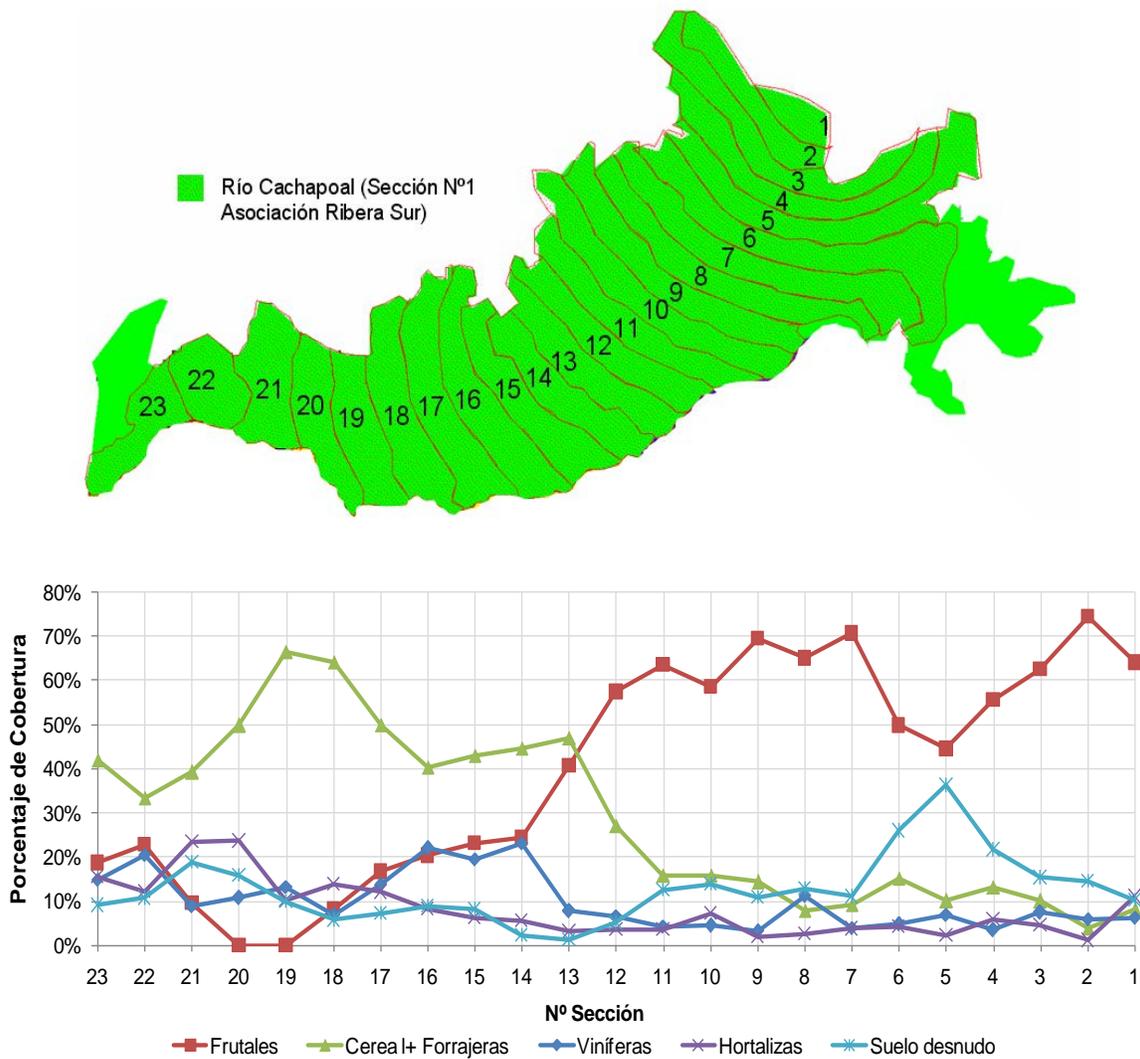


Figura 5.6. Distribución de grupos de cultivos por división Sección N°1 río Cachapoal.

Cuadro 5.3. 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 (Sept-Oct)			Período de Máxima Demanda (Dic-Ene)		
Tipo de Cultivo	Área (ha)	Demanda Inicial (m ³ /ha/día)	Volumen Inicial (m ³ /día)	Porcentaje (%)	Demanda Máxima (m ³ /ha/día)	Volumen Máximo (m ³ /día)	Porcentaje (%)
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%
TOTAL	21396.5		455636.7			2512731.1	
Caudal equivalente* (m³/s)			5.3			29.1	

* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m³/s. No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

5.3.2.2 Sección N°1 y N°2 del río Claro de Rengo

Para las secciones de riego del río Claro (ver **Figura 5.7**), 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 m³/s en el período inicial y 8,3 m³/s en el período de demanda máxima, según se muestra en el **Cuadro 5.4**. 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 m³/s en el período inicial y 3,7 m³/s en el período de demanda hídrica máxima, según se muestra en el **Cuadro 5.5**. 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.

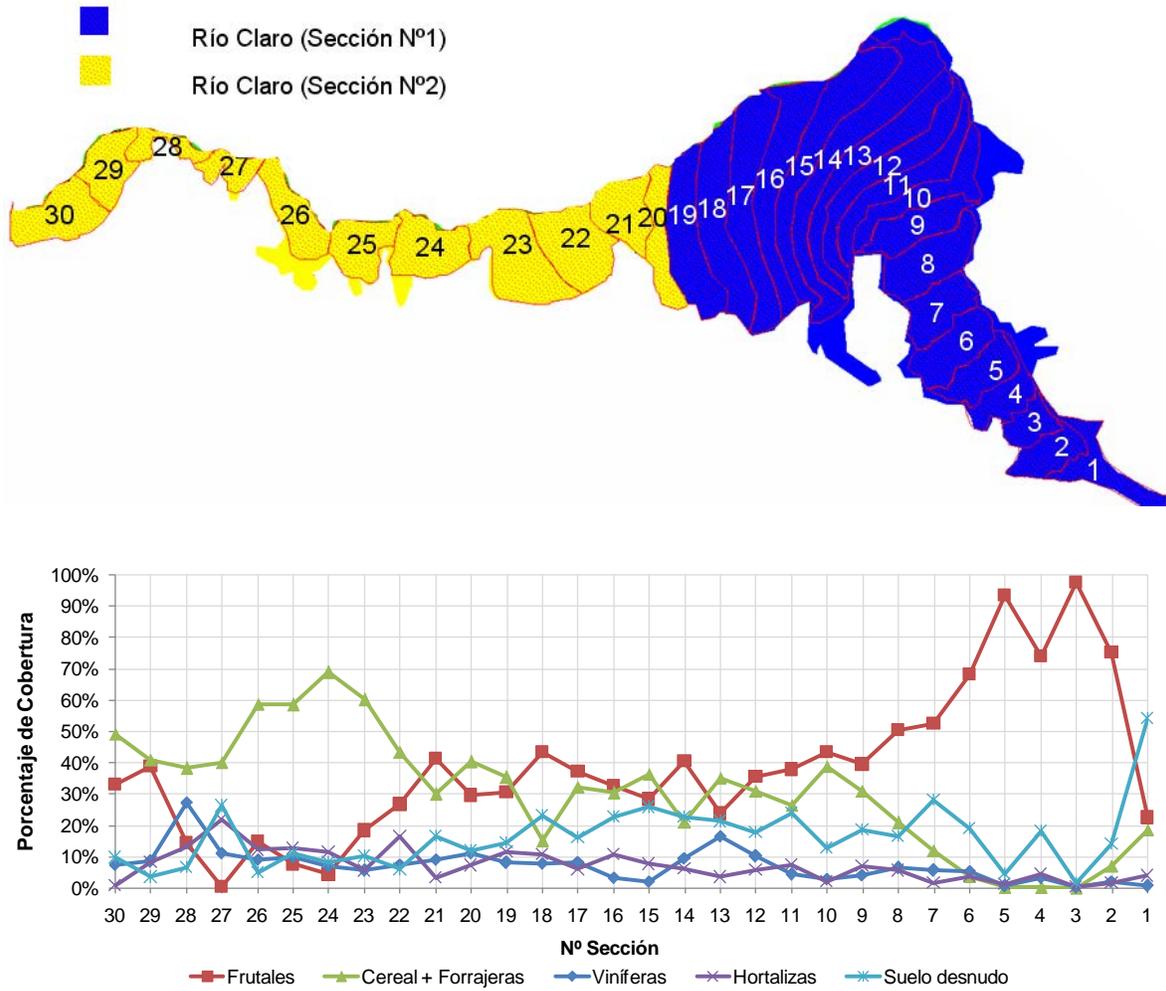


Figura 5.7. Distribución de grupos de cultivos por división Sección N°1 y N°2 río Claro.

Cuadro 5.4. 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 (Sept-Oct)			Período de Máxima Demanda (Dic-Ene)		
Tipo de Cultivo	Área (ha)	Demanda Inicial (m ³ /ha/día)	Volumen Inicial (m ³ /día)	Porcentaje (%)	Demanda Máxima (m ³ /ha/día)	Volumen Máximo (m ³ /día)	Porcentaje (%)
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%
TOTAL	6576.5		132191.4			721345.3	
Caudal equivalente* (m³/s)			1.5			8.3	

* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m³/s. No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

Cuadro 5.5. 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 (Sept-Oct)			Período de Máxima Demanda (Dic-Ene)		
Tipo de Cultivo	Área (ha)	Demanda Inicial (m ³ /ha/día)	Volumen Inicial (m ³ /día)	Porcentaje (%)	Demanda Máxima (m ³ /ha/día)	Volumen Máximo (m ³ /día)	Porcentaje (%)
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%
TOTAL	2428.8		54145.4			318310.7	
Caudal equivalente* (m³/s)			0.6			3.7	

* El Caudal Equivalente corresponde a una conversión de la demanda hídrica requerida in-situ en unidad de m³/s. No considera la eficiencia de conducción (pérdidas por infiltración) que puede aumentar el caudal necesario a nivel de bocatoma.

5.3.3 Índices vegetacionales

La información contenida en las firmas hiperspectrales 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. 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 observaron predios bien marcados con bajo estrés agrícola, asociados a cultivos con alto vigor (Maíz y Uva de mesa). En cambio, los cultivos que presentaron un mayor estrés agrícola son la Vid-vinífera y algunos frutales. Para determinar la distribución del índice estrés agrícola de los sectores con frutales, se efectuó una división del **Plano N° 8** generando la **Figura 5.8**.

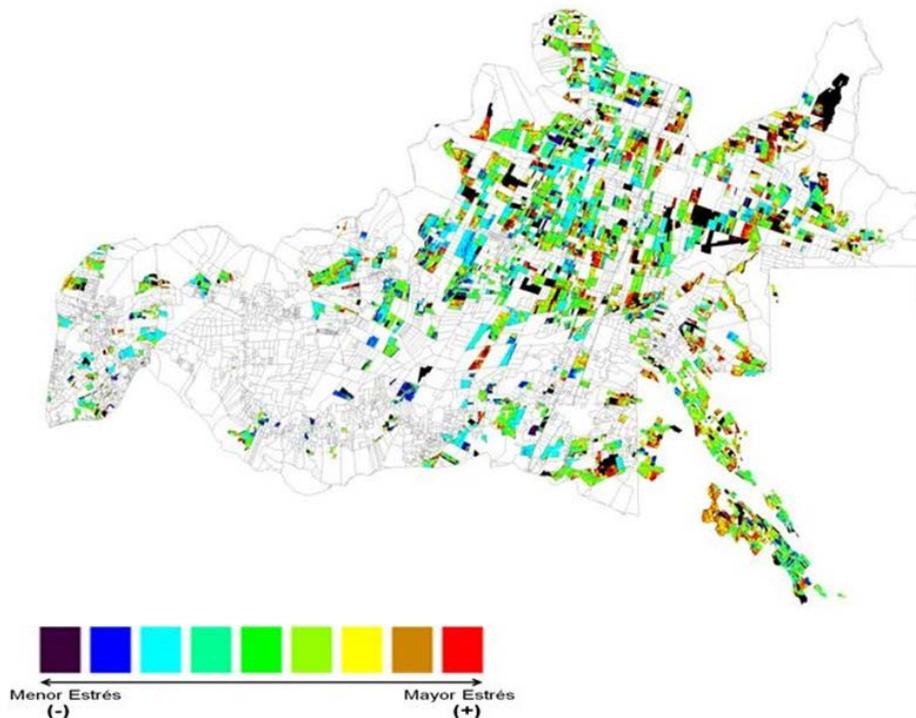


Figura 5.8. Índice vegetacional estrés agrícola para frutales (excluye vid-vinífera).

Como se observa en la **Figura 5.8**, 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.

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 5.9**).

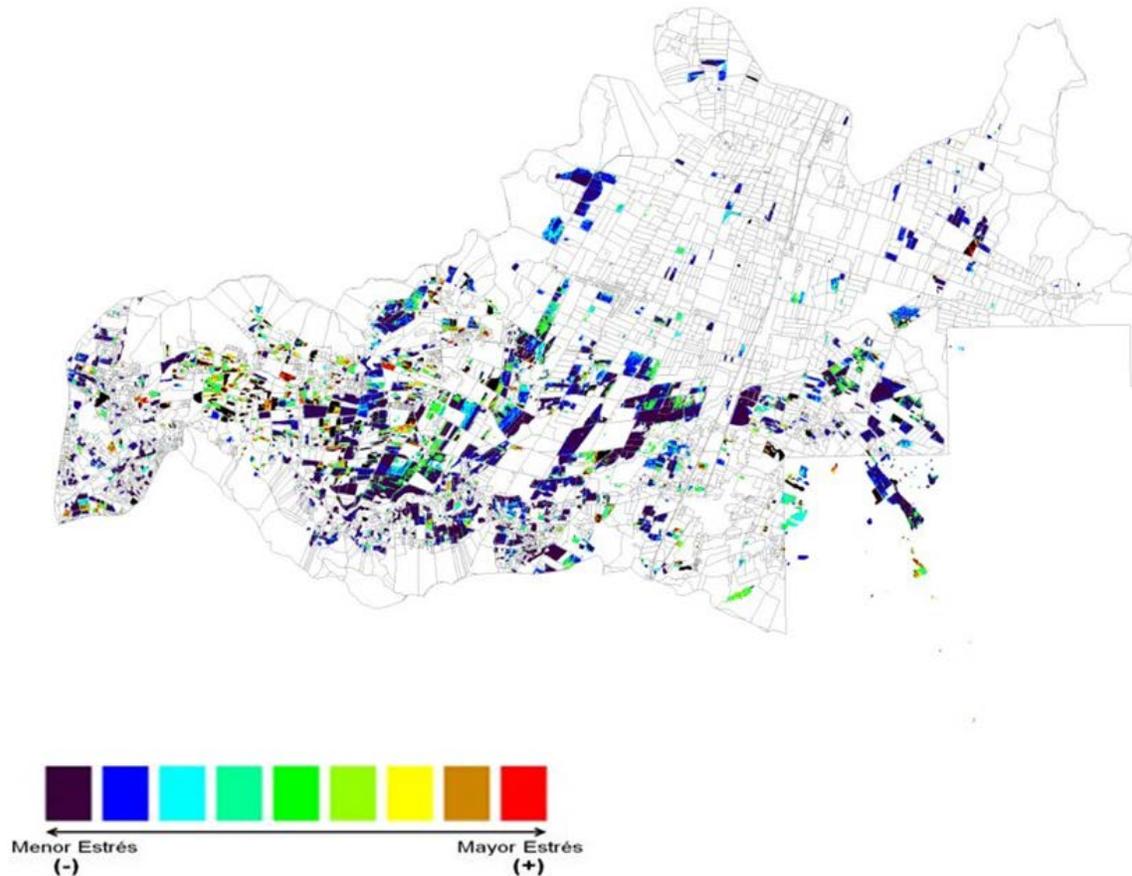


Figura 5.9. Índice vegetacional estrés agrícola para el cultivo del Maíz.

En la **Figura 5.9** 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.

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 de una cuenca. 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 es 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 entre los censos y permitiría tener mayor conocimiento de los cambios de la rotación de cultivos dentro de una 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 aportara 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 de 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.