



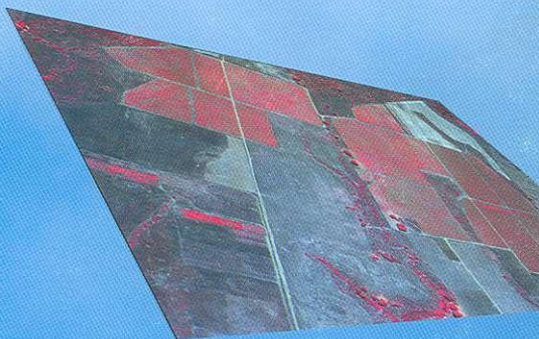
GOBIERNO DE CHILE  
MINISTERIO DE AGRICULTURA  
INIA



GOBIERNO DE CHILE  
FUNDACIÓN PARA LA  
INNOVACIÓN AGRARIA  
MINISTERIO DE AGRICULTURA

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

# Elementos de Vitivinicultura de Precisión



*Editores*

*Stanley Best S  
Lorenzo León G*

ISSN 0717 - 4829

Ministerio de Agricultura  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias  
Centro Regional de Investigación Quilamapu  
Chillán, Chile, 2006.

BOLETÍN INIA - N° 136

# Elementos de Vitivinicultura de Precisión

Editores

STANLEY BEST  
LORENZO LEÓN

Centro Regional de Investigación Quilamapu.

Chillán, Chile, 2006.

Editores Técnicos  
Stanley Best S.  
Lorenzo León G.

Director Regional INIA  
Claudio Pérez C.

Boletín INIA N° 136

Este Boletín fue editado por el Centro Regional de Investigación Quilamapu, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura.

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y editores.

Best S., Stanley; León G., Lorenzo. 2006.  
Elementos de Vitivinicultura de Precisión  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias  
Chillán, Chile.  
Boletín INIA N° 136. 82 p.

Consultor General  
Jorge González U.  
Sub Director Investigación y Desarrollo INIA

Editor General  
Hugo Rodríguez A.

Esta publicación entrega resultados obtenidos en el marco del proyecto "Desarrollo de la tecnología de manejo sitio específico en viñedos, para mejorar la calidad de la uva a vinificar" año 2005, con el apoyo financiero de la Fundación para la Innovación Agraria FIA.

Fundación para la Innovación Agraria (FIA)  
Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Programa de Agricultura de Precisión  
(Progap – INIA)  
Universidad de Concepción

Diagramación y Diseño  
Raúl Lama E.  
Rodrigo Venegas B.

Impresión  
Gutenberg@Talca

Cantidad de ejemplares: 300  
Chillán, Junio de 2006.

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

Prólogo	<b>9</b>
Introducción	<b>11</b>
<b>Capítulo I.</b>	
<b>Fundamentación</b>	<b>13</b>
I.1 Fundamentación agronómica	
I.1.1 Factores que influyen sobre la calidad y rendimiento en las vides	
I.1.2 Variabilidad y factores que afectan el rendimiento y calidad	
I.1.3 Variables biofísicas de importancia para la definición de la variabilidad del viñedo	
<b>Capítulo II.</b>	
<b>Elementos de Vitivinicultura de Precisión (VP)</b>	<b>21</b>
II.1 Sistemas de información geográfica	
II.2 Sensoramiento remoto	
II.2.1 Resolución	
II.2.2 Teledetección de Variables biofísicas de interés en VP	
II.3 Mediciones de planta	
II.3.1 NDVI e índice de área foliar	
II.3.2 Relación IAF/Carga frutal	
II.3.3. Obtención Mapas de rendimiento	
II.3.3.1 Cosecha manual del viñedo	
II.3.3.2 Cosecha mecanizada del viñedo	
II.3.4. Mapas de equilibrio	
II.3.5 Madurez frutal	
II.3.6 Estatus hídrico del viñedo	
II.3.6.1 Área foliar y riego	
II.3.6.2 Tecnologías asociadas a la determinación del estatus hídrico del viñedo	
II.4 Mediciones de propiedades de suelo	
II.5. Resumen de los elementos de VP descritos	
<b>Capítulo III.</b>	
<b>Implementación de esquema de Vitivinicultura de Precisión</b>	<b>41</b>
III.1 Estudio de caso a nivel de cuartel: aplicación de VP en la viña comercial (Cauquenes)	
III. 1.1 Obtención de un SIG del área del viñedo	
III.1.2 Ubicación geográfica de los centrales	
III.1.3 Identificación de zonas homogéneas	
III.1.4 Sectorizaciones	

III.1.5 Determinación de índice de área foliar (IAF) y puntos de muestreo	
III.1.6 Monitoreos en terreno de variables de interés	
III.1.7 Fertilidad	
III.1.8 Medición de estatus hídrico del viñedo	
III.1.9 Fenología de las plantas	
III.1.10 Calidad de uva antes de la cosecha	
III.1.11 Producción de uva y relaciones de equilibrio	
III.1.12 Determinación de cambios espacio - temporales	
III.1.13 Calidad de mostos, vino y zonificación	
III.1.14 Integración al sistema de gestión	
III.2 Estudios de caso: Gran escala. "Extensión del proyecto al medio vitivinícola"	
III.2.1 Revisión estudio de caso de viñas comerciales	
III.2.2 Implementación programa SIG para manejo del viñedo	

**Capítulo IV. Elementos de análisis cuantitativo 61**

IV.1 Geoestadística en VP	
IV.2 Autocorrelación espacial	
IV.3 Modelaje de superficie: interpolación espacial	
IV.4 Técnicas de caracterización de distribución de datos e interpolación espacial	
IV.5 Variograma	
IV.6 Kriging	

**Capítulo V. Evaluación económica 71**

**Capítulo VI. Desafíos a futuro 75**

VI.1 Manejo de las relaciones hídricas en el viñedo	
VI. 2 Manejo de agroquímicos en el viñedo en base a dosis diferenciales	
VI.3 Monitoreo de calidad de frutos: equipamiento NIR	

**Conclusiones 83**

**Bibliografía 87**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los Autores expresan sus más sinceros agradecimientos a Viña Martínez de Salinas (Cauquenes), por la colaboración en el proyecto “Desarrollo de la tecnología de manejo sitio específico en viñedos, para mejorar la calidad de la uva a vinificar”, y muy especialmente al Sr. Alfredo Visello por su apoyo a esta iniciativa y confianza en la línea de investigación y desarrollo propuesta, así como al Sr. Patricio Rojas por su continuo apoyo en las labores de terreno. Finalmente, el reconocimiento para la Fundación para la Innovación Agraria FIA, en especial a la profesional a cargo de la supervisión, por el apoyo y disposición para subsanar los distintos ajustes necesarios en el desarrollo del proyecto, que finalmente permitieron lograr el éxito obtenido.

## PRÓLOGO

El presente boletín de Vitivinicultura de Precisión (VP) es parte y producto del proyecto conjunto de la **Fundación para la Innovación Agraria FIA** y el **Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA** a través de su **Centro Regional de Investigación Quilamapu**, denominado "*Desarrollo de la tecnología de manejo sitio específico en viñedos, para mejorar la calidad de la uva a vinificar*". Posee una orientación teórico-práctica, complementando con información y aspectos técnicos basados en estudios de caso ejecutados en el marco del proyecto, que generan las bases orientadoras para la interpretación y aplicación a escala comercial de la VP.

El público objetivo de esta publicación esta compuesto, básicamente por viticultores, asesores profesionales en vitivinicultura y enología, técnicos y estudiantes del rubro en universidades y liceos agrícolas. No obstante lo anterior, y dado lo innovador de las temáticas descritas, también puede ser texto de consulta e introducción al ámbito de la Agricultura de Precisión, para lectores en general, interesados en el tema.

En sus aspectos prácticos se describen las experiencias recopiladas durante la ejecución del proyecto aludido, señalando los principales impactos generados en el manejo agronómico de viñas. Además, la información contenida refuerza y complementa los conceptos enseñados y material técnico entregado en diversos cursos de capacitación del proyecto.

*Elementos de Vitivinicultura de Precisión* está estructurado en seis capítulos; son ellos:

I Fundamentación; que presenta una reseña de los principios en que se fundamenta esta innovadora e incipiente tecnología en el país.

II Elementos de Vitivinicultura de Precisión; en esta sección se describen los principales elementos de esta tecnología para la determinación y análisis de variables de información, y se describen aquellos elementos tecnológico/metodológicos aplicados para dicha determinación.

III Implementación; que, mediante estudios de caso, aborda los métodos para que un viñedo vaya incorporando, en su manejo, los conceptos y técnicas de la VP.

IV Elementos de Análisis Cuantitativo; da a conocer las principales metodologías y herramientas de tratamiento geoestadístico de la información recopilada.

V Estudio de Rentabilidad; que describe, sólo a modo de referencia, un ejercicio simple de análisis económico de la VP.

VI Desafíos a Futuro; que introduce aspectos como las nuevas orientaciones en las relaciones hídricas en VP, las dosis diferenciales de agroquímicos y monitoreo de calidad organoléptica de fruta.

Finalmente, el presente boletín contempla una descripción de las principales conclusiones que al respecto es factible afirmar respecto la realidad de la VP en el país, y una completa información bibliográfica para consulta específica del lector.

Resta señalar el deseo y la confianza de FIA e INIA en que la presente publicación hará un aporte valioso y concreto al desarrollo del sector vitivinícola de Chile, a la innovación tecnológica de nuestro agro, y al bienestar de nuestros agricultores y todos aquellos que, directa o indirectamente, laboran en este sector vital de la economía nacional.

Jorge A. González U.  
Sub Director Investigación y Desarrollo  
INIA

Stanley Best S.  
Director PROGAP  
INIA



## INTRODUCCIÓN

Las actuales condiciones de competencia del mercado agrícola y del vitivinícola en particular, establecen la necesidad de incorporar urgentes transformaciones, en orden a aumentar la eficiencia productiva, la calidad del producto obtenido, y por tanto, la rentabilidad de la empresa, todo lo cual implica un replanteamiento en relación a las tecnologías aplicadas hasta hoy.

Dentro de estas tecnologías se encuentran aquellas conocidas como "teledetección" o "sensoramiento remoto", que permiten determinar a distancia, distintas características de los cultivos. Estas determinaciones se realizan mediante equipos montados en aviones o satélites. Por otra parte, existe otro importante conjunto de tecnologías que actúan como complemento del sensoramiento remoto: son los llamados "Sistemas de Información Geográfica" o SIG, tecnologías que son empleadas para la administración y gestión de la información territorial.

Por último, están las herramientas de análisis estadístico especialmente desarrolladas para este tipo de aplicaciones, generalmente conocidas como "geoestadística". Todas estas herramientas han tenido, en el ámbito vitivinícola, un gran desarrollo en países como Estados Unidos y Australia, desde 1994, donde se han aplicado con gran éxito soluciones en temáticas como la detección temprana de enfermedades, sectorización de cosecha de distintas calidades, manejo de riego, entre otras.

La investigación y desarrollo de estas tecnologías en esta área sigue perfeccionando y ampliando sus métodos y aplicaciones en la vitivinicultura, lo que ha permitido que diversos diagnósticos y actividades propias de la vitivinicultura sean manejados con precisiones sólo logradas en sistemas productivos de primer nivel, como el francés, en donde la determinación de las condiciones de manejo específico de los viñedos ha sido obtenida tras el trabajo de muchos años. Asociado a estas tecnologías, surge el concepto de "Vitivinicultura de Precisión", derivado del término más genérico de "Agricultura de Precisión" (AP), definida como "optimización de la calidad y cantidad de un producto agrícola,

minimizando el costo a través del uso de tecnologías más eficientes para reducir la variabilidad de una condición específica en forma ambientalmente limpia". Cabe señalar que a la utilización de sensores remotos en AP, se emplean tecnologías de medición en terreno que permiten llevar a una representación espacial, distintas variables de interés del viñedo.

Hasta el 2002 no existían precedentes en el uso de esta tecnología en el rubro vitivinícola en Chile. Es en este momento cuando comienza a ejecutarse el proyecto FIA-INIA "Desarrollo de la tecnología de manejo sitio específico en viñedos para mejorar la calidad de la uva a vinificar", cuyo objetivo general ha sido incorporar la tecnología de AP, de ahí el concepto de "Vitivinicultura de Precisión" (VP) a la industria vitivinícola nacional a través de una investigación que ha estudiado la optimización de los aspectos metodológicos a ser empleados y los principales factores que influyen sobre la variación en la calidad y rendimiento de la producción bajo nuestras condiciones. En el proyecto ha quedado de manifiesto, entre otras razones, por la existencia de una marcada tendencia en los países competidores a no transferir abiertamente estas tecnologías, dados los fondos que las empresas privadas asociadas asignan a los centros de investigación tecnológicos y universitarios que realizan desarrollos en VP.

La investigación y desarrollo derivados de este proyecto ya tiene claros resultados a nivel nacional, al haber sido incorporadas varias de sus metodologías por empresas del área con promisorios resultados. En el presente boletín se presentan los lineamientos básicos para obtener una mejor interpretación de la información derivada de las aplicaciones en VP, así como también estudio de caso con aplicación de esta tecnología.

## **CAPÍTULO I FUNDAMENTACIÓN**

Autores  
Lorenzo León G.  
Stanley Best S.

## **I.1 Fundamentación agronómica**

### *I.1.1 Factores que influyen sobre la calidad y rendimiento en las vides.*

La calidad y el rendimiento en los viñedos varían en relación a distintos factores productivos, los que han de ser optimizados para obtener una mayor rentabilidad.

Pero, ¿a qué nos referimos cuando se habla de “calidad” en la uva? Según Jackson y Lombard (1993), la calidad de la uva para vinificación no es fácilmente definible. Sin embargo, estaría relacionada con características tanto *intrínsecas* como sensoriales de sabor y aroma, las cuales puedan ser percibidas como “sobre el promedio” para cada tipo de vino. Dentro de estas características o variables de composición determinados en los análisis químicos, se encuentran, por ejemplo: sólidos solubles, acidez titulable, pH, fenoles y antocianinas, monoterpenos, etc.

En términos generales, la mayor parte de cuarteles en los que se producen vinos de calidad son aquellos que poseen rendimientos bajos a moderados. No obstante, a pesar de encontrarse esta vinculación entre el rendimiento y calidad, también se ha demostrado que el rendimiento no actúa como un factor aislado en la modificación de las características de la uva para vinificación. Es así como diversos autores han señalado una mayor relevancia de la relación entre cantidad de fruta, y el área foliar (lo cual también ha sido expresado como peso de poda) y las características organolépticas de la uva, que son necesarias para la producción de vinos de alta calidad.

Debido a que la fuente de azúcares y fotosintatos se encuentra en las hojas, la relación entre área foliar y peso de fruto es considerada como un factor crítico en la determinación del nivel de azúcares en los frutos. Así, en distintas investigaciones se han determinado rangos óptimos de relación hoja/frutos para ser aplicados en la producción de distintas variedades (Smart, 1985; Kaps and Cahoon, 1986; Kaps and Cahoon, 1992). Si se está bajo de estos rangos, la *proporción de carbohidratos comienza a bajar*, mientras que si se incrementa la relación, se obtiene un aumento poco significativo de carbohidratos.

De igual forma, se ha sugerido que el factor que contribuye en mayor medida a una baja calidad de la uva para vinificación, corresponde a las condiciones de sombreadamiento excesivo de las plantas (Smart *et al.*; 1991; 1985a, 1985b). Según Kilewer y Weaver, (1977); la falta de luz contribuye a la formación de bayas descoloridas, produciendo también una disminución de los sólidos solubles, aumentando la acidez de la uva, los sabores herbáceos y el volumen de bayas, lo cual contribuye a la disminución en el contenido de antocianinas o intensidad colorante en las bayas, con una consecuente reducción en la calidad de la uva y del potencial del vino a obtener. Además, un exceso de sombreadamiento puede atrasar la cosecha e incrementar las posibilidades de ocurrencia de enfermedades en la fruta (Iland *et al.*, 1995, Smart, 1995, 2001).

También se ha encontrado que en vides con bajas relaciones área foliar/fruta se desarrolla en esta una menor acidez total, mayor concentración de antocianinas y compuestos aromáticos tales como terpenos volátiles potenciales y, consecuentemente, una mayor calidad percibida en el vino obtenido (Reynolds y Wardle, 1989a; 1989b). Asimismo, hay reportes de que el volumen de cobertura de hoja de una planta o canopia que posee racimos más expuestos a la luz solar produce vinos con una mayor calidad (Smart, 1982). No obstante lo anterior, el exceso de exposición directa de los racimos a la luz produce quemaduras de sol, detención del crecimiento de las bayas, y la inactivación de enzimas involucradas en la síntesis de antocianinas (Pérez, 1993).

De esta forma, se ha concluido que en los viñedos se pueden alcanzar rangos óptimos de relación hoja/frutos, poniendo el énfasis en alcanzar una optimización de rendimiento y calidad, dado que se persigue el concepto que las plantas trabajen en función de su potencial productivo, con lo cual se pueden incrementar los ingresos del productor.

### *1.1.2 Variabilidad y factores que afectan el rendimiento y calidad.*

La modificación de este rendimiento y relaciones de carga se vinculan a la variabilidad de los factores productivos que se pueden encontrar en terreno. Esta variabilidad se produce dentro del área de cada cuartel. Es por esto que

en VP se habla de variabilidad espacial, la cual se puede definir como “el grado de cambio en el espacio de los factores que influyen la calidad y el rendimiento”.

Es ampliamente reconocido que las diferencias medioambientales dentro del viñedo, en relación a suelos, microclima y topografía, pueden afectar las características de la uva y el rendimiento del viñedo, dado que estas variaciones influyen sobre la cantidad de follaje para un cuartel específico, y, además, sobre la relación hoja/fruto del mismo. Por otra parte, se considera que tradicionalmente las labores de poda y raleo de racimos se desarrollan sobre la base de cuarteles completos, entonces, se tiene que para un cuartel en particular las condiciones heterogéneas (fundamentalmente de suelo, y por este factor, la capacidad de retención de humedad) influyen notoriamente la cantidad de follaje desarrollada, lo que a su vez determina, en gran medida, la variabilidad observada en la relación hoja/fruto dentro del cuartel, cuando se utilizan criterios de poda y raleo estándares dentro del mismo.

Es importante destacar que en Chile los viñedos usualmente presentan una alta variabilidad en los factores como suelo - planta - agua - microclima, etc., los que influyen notablemente sobre el comportamiento fisiológico de las vides, traduciéndose finalmente en diferencias significativas en la calidad y rendimiento de la fruta obtenida. Como ya ha sido mencionado, a nivel de cuartel, sólo si se consideran las propiedades del suelo, es posible encontrar un variado número de texturas, profundidades, densidades. Por otra parte, las características químicas del suelo presentan también alta variabilidad: fertilidad y conductividad eléctrica, principalmente. De esta manera se originan distintas calidades de fruta, las que darán como resultado distintas calidades de vinos, algunas de ellas no deseadas por la viña en términos de rentabilidad.

Si un área de producción presenta un nivel homogéneo de algún factor condicionante del rendimiento y/o calidad, requerirá de un mismo manejo agronómico, aplicado sobre esa área, para producir un determinado nivel de producción y calidad de uva. Si el área de producción presenta más de un nivel de dicho factor, significa que se obtendrán distintos niveles de rendi-

miento y calidad, a menos que se apliquen distintos manejos agronómicos sobre dicha área, con lo cual se logrará la obtención de un nivel homogéneo de rendimiento y calidad de uva en toda la unidad productiva. Lo anterior constituye la base de la tecnología de VP.

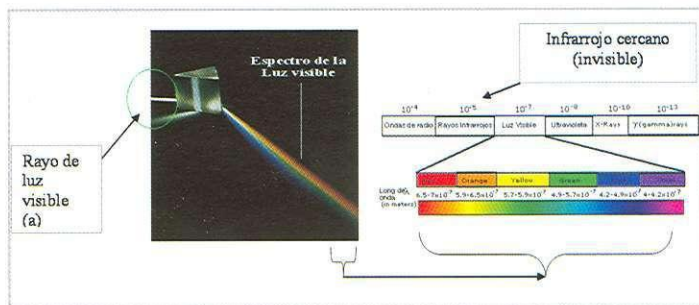
Por otra parte, los factores que influyen la calidad y rendimiento en los viñedos también varían de una temporada a otra, lo cual está determinado esencialmente por las condiciones meteorológicas en cada año y su interacción con las labores de manejo que se desarrollan paralelamente en el viñedo. De esta forma, se produce también una "variabilidad temporal", que es importante considerar. Así, finalmente, el término de "variabilidad espacio-temporal" se utiliza para reseñar la variación de factores, tanto al interior de los cuarteles como entre temporadas.

### *1.1.3 Variables biofísicas de importancia para la definición de la variabilidad del viñedo.*

Como ya ha sido señalado, una variable fundamental a ser determinada en la VP, corresponde a la variabilidad espacial de la cantidad de follaje en el viñedo. Actualmente, mediante técnicas de teledetección o detección a distancia mediante sensores se puede determinar la cantidad relativa (niveles alto, medio, bajo de vigor) y, mediante técnicas de calibración, la cantidad absoluta ( $m^2$  de hojas por  $m^2$  de suelo) de follaje que existe en los distintos sectores del viñedo. Todo lo anterior será detallado más adelante en el presente boletín. Sin embargo, es pertinente referirse en este punto a la naturaleza de la variable determinada por los sensores remotos que hacen posible esta determinación. Este caso refiere a la naturaleza de la luz y al espectro electromagnético.

La luz visible, al pasar por un prisma está compuesta por los colores que es posible percibir, tal como puede observarse en la Figura 1, yendo desde el rojo al violeta. Cada uno de estos colores tiene asociada una determinada longitud de onda. Si se desplaza en la escala de longitudes de onda, se registrarán longitudes de onda invisibles a la vista humana. En este caso, en primer término, se encuentran las longitudes correspondientes al infrarrojo cercano y del ultravioleta.

Para los fines de caracterización de cultivo, el caso de la radiación de color rojo (visible) e infrarrojo cercano (invisible) son de gran importancia, dado que una planta con mayor cantidad de follaje tendrá una mayor absorción de rojo visible y “rechazará” mayores cantidades del infrarrojo cercano. Todo lo contrario ocurre en una planta con menor cantidad de follaje. La posibilidad de detectar lo anterior ha posibilitado establecer índices vegetacionales, empleados en el esquema de VP, para establecer la variabilidad de follaje en terreno.



**Figura 1.** Espectro electromagnético compuesto por longitudes de ondas visibles y no visibles. La longitud de onda correspondiente al infrarrojo cercano (no visible), es muy útil para establecer el nivel de vigor en los cultivos.



**CAPÍTULO II**  
**ELEMENTOS DE**  
**VITIVINICULTURA**  
**DE PRECISIÓN (VP)**

Autores

Stanley Best S.

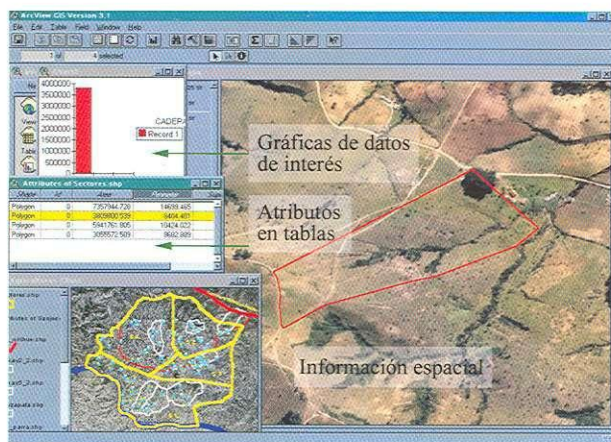
Lorenzo León G.

Marcelino Claret M.

## II.1 Sistemas de información geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), constituyen importantes herramientas que permiten ordenar, representar y almacenar en un computador la información relativa a las características geográficas de un área en particular. En la actualidad, éstas son capaces de integrar tanto elementos vectoriales (puntos, líneas y polígonos) como archivos raster cuyas imágenes son construidas por píxeles.

Un SIG, en términos simples, es una base de datos espacial, es decir, un sistema que integra información cartográfica en la forma de coberturas (como las capas de una torta) con información en tablas de atributos asociadas a cada una y que además, está ligada a un sistema de coordenadas terrestres. Las bases de datos SIG permiten visualizar espacialmente una zona geográfica en coberturas, imágenes y fotos aéreas, analizar la información, graficar, responder distintas consultas por parte del usuario; en definitiva permiten gestionar dicha información geográfica en forma eficiente.



**Figura 2.** Esquema de un SIG, en cuyas funcionalidades está el análisis de la información en forma numérica, edición y manejo de atributos en tablas de datos y la representación gráfica de la información.

## II.2 Sensoramiento remoto

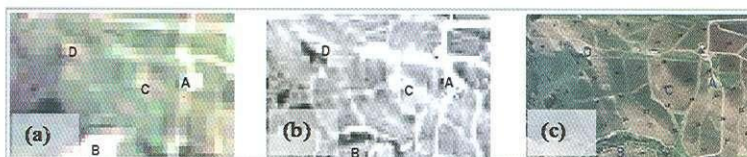
El sensoramiento remoto (SR) o "remote sensing", es la medición o adquisición de información de un objeto o fenómeno por medio de un equipo que no está en contacto físico con dicho objeto.

En VP, el SR se ha realizado fundamentalmente utilizando "cámaras multiespectrales", las que son capaces de capturar tanto en el espectro visible, como también radiación que se encuentra fundamentalmente en el rango del infrarrojo cercano. En el caso de la determinación de las características de un viñedo, lo más empleado ha sido la determinación de las características vegetativas de la viña, dada la absorbancia (absorción de una superficie a una determinada longitud de onda) y reflectancia (reflexión o "rebote" de una longitud de onda determinada). Esta energía es capturada por los sensores, para luego ser procesada. En el trabajo en SR, generalmente se deben solucionar distintos problemas básicos, referidos particularmente a la escala de la imagen, alineamiento, resolución, interpretación y almacenaje. A continuación se dará una breve reseña de la problemática de resolución de imagen, para luego definir variables de importancia determinadas mediante el sensoramiento remoto.

### II.2.1 Resolución.

La resolución para un sensor en particular puede ser descrita en cuatro formas distintas: espacial, temporal, radiométrica y espectral (Lamb *et al.*, 2001, Verbyla, 1995). Si la resolución de los datos para cualquiera de estos atributos es incorrecta para la aplicación específica, los datos derivados serán de poco valor. La resolución espacial se refiere al objeto más pequeño detectable en el suelo (Hall *et al.*, 2002) y en sensoramiento remoto es igual al tamaño final del píxel de la imagen (Verbyla, 1995). El tamaño del píxel de una imagen es una función de los píxeles que se pueden formar en el sensor y de la altura del sensor sobre el suelo. La interacción de estos dos parámetros determina el área final cubierta por la imagen. Para un sensor determinado mientras más alto realiza sus determinaciones abarca una mayor área, pero reduce la resolución espacial de la imagen (Figura 3). Las plataformas aéreas son más flexi-

bles que las satelitales en este sentido, ya que se puede variar la altitud dependiendo del objetivo propuesto. La resolución temporal se refiere a la frecuencia con que un sensor puede hacer mediciones sobre un área determinada, Mientras que la resolución radiométrica se refiere al número de valores disponibles para grabar los valores de radiación en cada píxel (Lamb *et al.*, 2001). Típicamente estos valores varían entre 8-bits ( $2^8 = 256$  valores) o 10-bits ( $2^{10} = 1024$  valores) (Hall *et al.*, 2002).



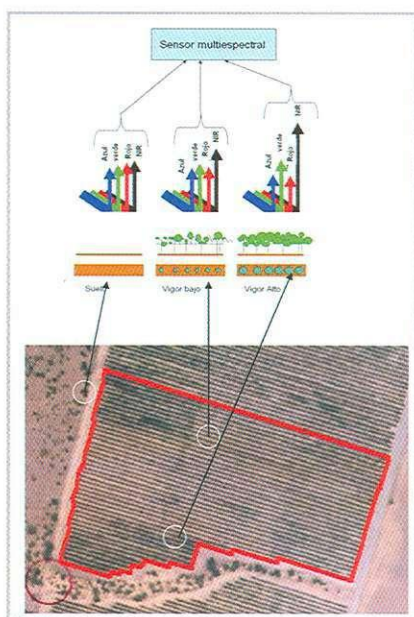
**Figura 3.** Imágenes de viñedos de diferentes resoluciones espaciales obtenidas a partir de sensores montados en el satélite Landsat 7, ( a y b con 25 y 5 m de resolución respectivamente); c imagen aerotransportada (con 2 m<sup>2</sup> de resolución). (Adaptado desde Taylor, 2004).

### II.2.2 Teledetección de Variables biofísicas de interés en VP.

Si se considera la reflectancia de las hojas de las plantas (o canopias) en comparación al suelo, éstas presentan una mayor refracción de la energía en el espectro infrarrojo comparado con el rojo, el cual es absorbido en gran medida por las hojas (Figura 4). La reflectancia de estas regiones del espectro forma la base para la determinación de los índices vegetacionales. Uno de los índices más empleados en VP, corresponde al "índice vegetativo diferencial normalizado" o "NDVI", por sus siglas en inglés, el cual es asociado a distintas categorías de vigor. Típicamente estas categorías pueden corresponder a vigor alto, medio y bajo.

Para la obtención del plano de NDVI, se utiliza la ecuación (1) para el cálculo del índice por píxel de la imagen.

$$\text{NDVI} = (\text{banda NIR} - \text{banda ROJA}) / (\text{banda NIR} + \text{banda ROJA}) \quad (1)$$



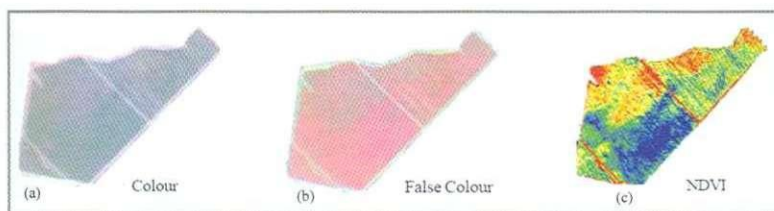
**Figura 4.** La cantidad de radiación adsorbida y reflejada tanto en el espectro visible como en el infrarrojo cercano (NIR) en viñedos (con distinta biomasa) y suelo.

De esta manera, para obtener una caracterización mediante sensores remotos del estado vegetacional del viñedo, se debe obtener una fotografía aérea del viñedo. Esta fotografía puede capturar y hacer visible un tipo de energía que “rebota” más en las plantas, cuanto más follaje tienen éstas. Esta energía se llama “radiación IR (Infrarroja) del espectro”. Por otra parte, una cantidad de energía que forma parte de la luz visible al ojo humano (azul, verde y rojo) es la luz roja (R). Esta luz roja, al contrario de la radiación IR, se absorbe más cuanto más follaje o capas de hojas tenga un cultivo o viñedo (rebotando menos a partir de la superficie, cuanto menos capas de hojas existen). Las hojas verdes absorben sobre el 85% de la radiación visible, pero en ellas rebota (scatter) por lo menos el 85% de la radiación en la banda del infrarrojo cercano del espectro. En contraste, los suelos reflejan condiciones aproxima-

damente similares de Radiación Visible (PAR), e infrarrojo cercano (NIR). Si se emplean los sensores para la banda roja (R) y NIR del espectro, los problemas de interferencia atmosférica son disminuidos, ya que hay poca diferencia entre la longitud de onda de las bandas empleadas. Por lo tanto, la razón de las reflectancias espectrales de una superficie para el R y el NIR pueden ser usados como una medición de la cubierta de cultivo o índice de área foliar.

Así, si hacemos la diferencia entre la cantidad de luz IR rebotada-cantidad de luz roja absorbida, y si lo dividimos por la suma de ambos valores, tendremos una idea del nivel de vigor del follaje que hay en cada punto del viñedo, variando este valor entre 0 y 1. En la Figura. 2 se muestra un resumen de las variables estudiadas en VP para la realización de un manejo de sitio específico.

En la Figura. 5, se detallan distintos tipos de fotografías que es posible capturar para una caracterización de la variabilidad espacial de un viñedo, mostrando además un plano de NDVI derivado del análisis de la imagen multispectral. Entre ellas se cuenta en primer término con una fotografía a "color", compuesta por la combinación de la banda roja, azul y verde del espectro visible y una fotografía en "falso color", en la cual se colorea en rojo los valores de la banda IR cercano. Esta última es utilizada para la determinación del valor "NDVI" del píxel de la figura.



**Figura 5.** Tipos de fotografía aerotransportadas existentes, derivado de la imagen y plano de NDVI de falso color. (Adaptado desde Taylor, 2004).

## II.3 Mediciones de planta

### II.3.1 NDVI e índice de área foliar.

La cantidad de follaje y la relación carga/fruto en la fisiología de la vid, determinan integralmente la variabilidad intrínseca de los cuarteles y han sido señalados como factores integradores (Best and León, 2005). En consecuencia, diagnosticar estas variables tiene una alta importancia para las labores programadas en el viñedo (podas, riego, fertilización, entre otras).

Como ya ha sido mencionado, la determinación de la cantidad de follaje se ha realizado utilizando los denominados "índices de vigor", en donde se describe la variable "vigor" de manera "relativa", vale decir, es posible ver en los cuarteles donde hay más o menos vigor pero no es posible señalar cuál es la cantidad real de follaje que hay en un sector u otro (Figura 5c), en términos de m<sup>2</sup> de follaje por m<sup>2</sup> de suelo (vale decir, en términos de índice de área foliar o IAF), lo cual se denomina determinación de follaje en términos "absolutos". La determinación "relativa" que se realiza basándose en el NDVI, fluctúa entre 0 y 1.

En este punto es posible decir, que en el viñedo existen zonas con distintas clases de vigor; por ejemplo si hay tres clases, hablaremos de vigor alto, medio y bajo (Figura 6). Por su parte, la determinación "absoluta" mediante el cálculo del índice de área foliar, se puede realizar tras una corrección de los valores de NDVI a índice de área foliar. Esta relación está respaldada por numerosos trabajos en VP (Johnson *et al.*, 1996).

En Chile, dicha desuniformidad en las variables que influyen sobre la expresión vegetativa de los viñedos se expresa marcadamente en los suelos, lo cual se debe, en gran parte, a los factores de formación de dichos suelos, que en su mayoría tienen un origen aluvial.

En el esquema de VP, la segmentación de los cuarteles para la cosecha diferenciada que considera la variabilidad interna, ha sido determinada sobre la base de si un sector posee más o menos volumen foliar. Por otra parte, los muestreos para la determinación del rendimiento en el viñedo y la relación

hoja/fruto, se definen en relación a la distribución de la cantidad de follaje que hay en los distintos cuarteles. En este sentido, mediante el empleo imágenes capturadas por sensores remotos, se han obtenido mapas de estas diferencias relativas en la densidad de la canopia.

El uso de imágenes multiespectrales aéreas, para el cálculo del NDVI, ha sido de gran utilidad para la determinación del IAF y el mapeo de las diferencias en la densidad de la canopia de los cuarteles de un viñedo (Figura 7) (Johnson *et al.*, 1998, 2001). Actualmente, existe una creciente demanda por imágenes de este tipo, las que son ofrecidas por empresas especialistas en el área. La determinación del IAF, derivado de NDVI, es posible sólo si se realiza un adecuado proceso de calibración, en el cual se debe correlacionar las mediciones de NDVI determinadas por imágenes multiespectrales, con determinaciones en puntos específicos en terreno donde se pueden realizar dos tipos de procedimientos:

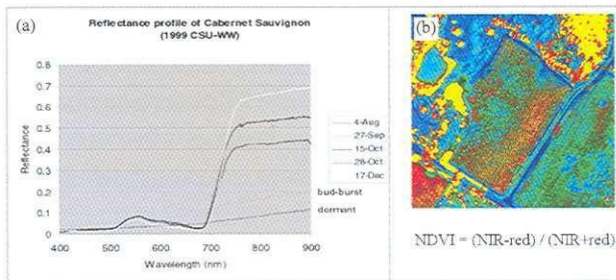
- (i) Determinación de IAF directamente, (Figura 8)
- (ii) Determinación de IAF, mediante un equipo basado en fotografía hemisférica. Presenta como ventaja respecto del anterior su rapidez. Sin embargo, este procedimiento requiere también de una calibración inicial (Figura9).

Johnson *et al.*, 2003, ha señalado que los resultados de las correlaciones entre NDVI \_IAF han mostrado resultados suficientemente robustos para establecer una base de cálculo del área foliar o índice de área foliar en un viñedo, reduciendo adecuadamente los efectos del sistema de conducción del viñedo (arquitectura de canopia), densidad de plantas, variedad, edad, tipo de suelo, topografía y fecha de adquisición de las imágenes.

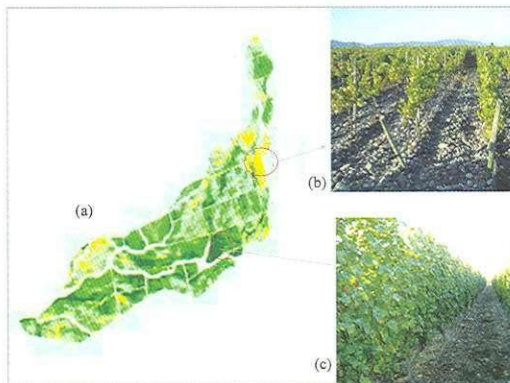
El área foliar es relevante a la hora de efectuar manejos de canopia y de riego. Por lo tanto, la determinación mediante sensores remotos de IAF se puede vincular luego con el manejo de canopia, el cual, a su vez, es empleado para influenciar el microclima de los racimos y asegurar un adecuado abastecimiento de carbohidratos al fruto (Iland *et al.*, 1994). Por otra parte, El IAF



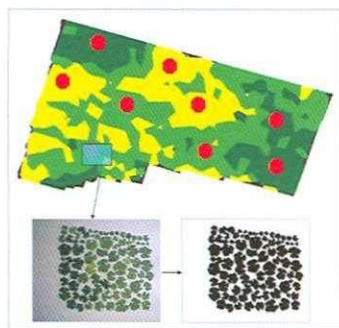
derivado de determinaciones con sensores remotos, puede servir para parametrizar los modelos de manejo del riego (Nemani and Johnson, 2001), para el mantenimiento de las vides dentro de los límites deseados, con el manejo del déficit hídrico (asociado a ciertos períodos fenológicos relevantes) mediante un riego controlado. Todos estos aspectos actualmente siguen en evaluación por el mundo científico, en orden a optimizar las tecnologías implementadas para desarrollar estas determinaciones.



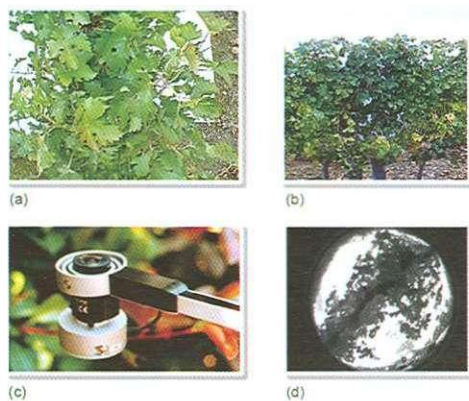
**Figura 6.** La Fórmula de NDVI relaciona los valores de reflectancia del rojo (red) e IR cercano del cultivo (NIR). En esta figura, los colores rojos y amarillos representan altos valores de NDVI, mientras que los tonos azules y verdes, bajos valores de NDVI. (Adaptado desde <http://www.terraspace.com/vinimage.htm>).



**Figura 7.** Representación de Índice de área foliar para un viñedo completo (Viña Santa Rita, Alhué), en donde se destacan dos puntos con vigor bajo y alto.



**Figura 8.** Muestreo de hojas para determinar IAF en forma directa, en puntos de muestreo en un viñedo dividido en clases de NDVI. En la parte inferior de la imagen, se puede apreciar el análisis fotográfico del área foliar en una planta.



**Figura 9.** Determinación del área foliar mediante fotografía hemisférica, en donde (a) fotografía de la parte superior de la canopia; (b) fotografía lateral; (c) sensor fotografía hemisférica; (d) fotografía hemisférica capturada con el sensor, las cuales son analizadas en un software especializado para la determinación del IAF.

### *II.3.2 Relación IAF/Carga frutal.*

Tal como fue mencionado en el capítulo de Fundamentación, para obtener uva de calidad para vinificación, es de gran importancia establecer un adecuado equilibrio entre la producción frutal y la cantidad de follaje o IAF en el viñedo, llegándose a establecer rangos aceptables de m<sup>2</sup> de hojas por kg de fruta producida.

Hasta ahora se ha visto que en el caso del IAF, se pueden establecer zonificaciones para los valores de esta variable (y por lo tanto, mapas) en el viñedo (Figura 7). De igual forma, si se quiere obtener una visualización clara de cuál es el estado de esta relación en los cuarteles de una viña (y así establecer criterios posteriores de manejo), es de la mayor importancia tener una alta densidad de datos de rendimiento por unidad de superficie.

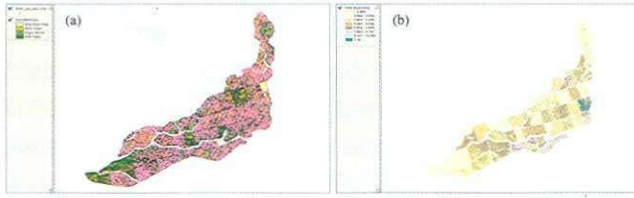
Lo anterior, con el objetivo de establecer mapas de redimiendo y, luego, mapas de equilibrio en el viñedo. Para determinar una densidad de información adecuada para realizar mapas de rendimiento en el viñedo, se realizan distintos procedimientos, según sea la cosecha manual o mecanizada. A continuación serán presentadas dichas metodologías.

### *II.3.3. Obtención Mapas de rendimiento.*

#### *II.3.3.1 Cosecha manual del viñedo.*

En este caso se realiza un muestreo dirigido, el cual está basado en la variabilidad del NDVI en los cuarteles. En cada punto seleccionado se realiza una determinación del número de racimos y peso final, con lo que se obtiene una estimación del rendimiento por unidad de área.

Para la estimación de número de racimos por área de vigor usualmente se escoge un número mínimo de puntos de monitoreo (10 puntos/ha, considerando 3 plantas en cada punto), los cuales se localizan en función de las centrales y las áreas de vigor en cada cuartel (Figura 10 a y b).



**Figura 10.** (a) Puntos de Monitoreo (marcados en rojo) en el viñedo de peso de racimos, seleccionados según área de vigor (asociado a NDVI, representado por distintos tonos en los cuarteles). (b) plano de rendimiento obtenido en un viñedo comercial (230 ha).

### II.3.3.2 Cosecha mecanizada del viñedo.

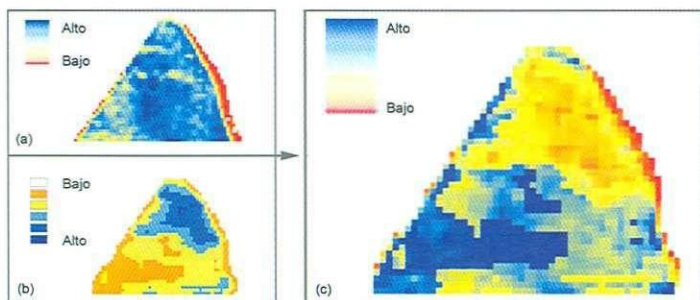
En este caso, se puede acoplar un sistema digital de medición del peso de la uva cosechada. En la Figura 11 se puede apreciar un ejemplo de este tipo de sistemas, el cual tiene un sensor de peso en la cinta transportadora de uva entre la cosechadora y la tolva de descarga. Los valores de peso son almacenados en un sistema especializado, asociando los valores de peso de fruta con la lectura de un GPS diferencial ubicado en la cosechadora. Luego, esta información es utilizada para la realización de mapas especiales de rendimiento.



**Figura 11.** (a) Mapa de cantidad de hojas ( $m^2$  de hojas por planta); (b) mapa de rendimiento de viñedo derivado de datos de cosecha (kg de fruta por planta); (c) mapa de balance hoja/frutos ( $m^2$  de área de hoja por kg de fruta). (Adaptado desde Taylor, 2004).

### II.3.4. Mapas de equilibrio.

Como ya ha sido señalado, el balance entre producción, hojas y frutos afecta la calidad y el rendimiento (Iland *et al.*, 1995; Smart 1995, 2001). El tamaño de canopia debería representar una suficiente capacidad de producción de fotosintatos para sostener la maduración de frutos, evitando, asimismo, el exceso de sombreadamiento que puede retardar la maduración e incrementar problemas tales como la ocurrencia de enfermedades y la disminución en la calidad de fruta por la aparición de sabores herbáceos en la fruta. Distintas investigaciones han establecido óptimos de balance hoja/frutos ( $m^2$  de área de hoja por kg de fruta), encontrándose gran parte de éstos en el orden de 1  $m^2$  de hoja por 1 kg fruta. En el caso de la VP, estos balances se pueden obtener en virtud de la información obtenida en cuanto a IAF, derivado de NDVI; más la información de rendimiento. Esta información (ya representada en mapas), puede ser llevada a un mapa de equilibrio mediante SIG (Figura 12). Finalmente, esta información es de alta relevancia para establecer criterios de poda y raleo en los distintos sectores del viñedo.



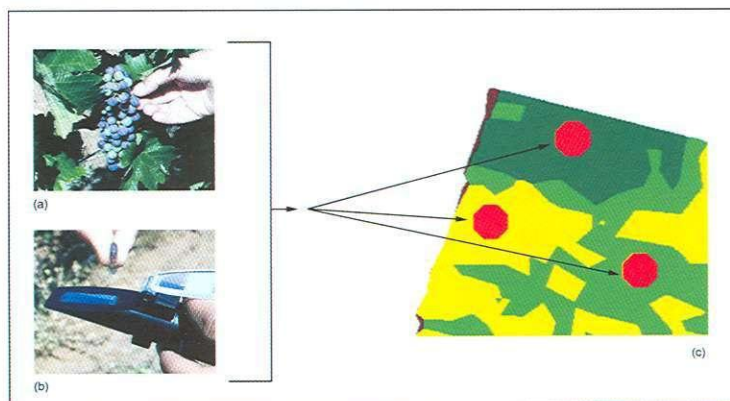
**Figura 12.** Ejemplo de información empleada para la generación de mapa de equilibrio en una sección de un viñedo, en donde se presenta (a) mapa de cantidad de hojas ( $m^2$  de hojas por planta), obtenido por análisis de la imagen multiespectral; (b) mapa de rendimiento de viñedo derivado de datos de cosecha (kg de fruta por planta); (c) mapa de balance hoja/frutos ( $m^2$  de área de hoja por kg de fruta). En (c), se puede señalar qué áreas con una mayor cantidad de hojas por kg de fruto (en azul) podrían soportar una mayor producción de fruta. (adaptado desde Johnson *et al.*, 2003).

### II.3.5 Madurez frutal.

En los estudios desarrollados hasta el momento en VP, la tecnología de medición de madurez de la uva se basa principalmente en la determinación de sólidos solubles, (refractometría, Figura 13), y muestreo para determinación en laboratorio de pH, acidez titulable y alcohol probable. Sin embargo, la aplicación de estas metodologías en cuanto al muestreo de fruta, se encuentra diseccionado a cubrir zonas de interés antes definidas según los planos de vigor establecidos en función de variables como el NDVI. De esta manera, se optimiza el uso de recursos en estas actividades que son recurrentes antes de cosecha y se comprueba las reales tendencias de calidad de la uva en los sectores diferenciados. No obstante lo anterior, existe en nuestro medio la necesidad de incorporar una medición de estas características que sea:

(i) no destructiva,

(ii) que se pueda realizar una mayor cantidad o densidad de mediciones en poco tiempo en el viñedo. Este tipo de tecnologías ya está en aplicación y en continuo desarrollo, y se refiere a la espectrometría infrarroja cercana (NIR), con equipos portátiles, la que será descrita más adelante.



**Figura 13.** (a) y (b) Medición de sólidos solubles utilizando un refractómetro; (c) puntos de muestreo escogidos según NDVI. En estos mismos puntos de muestreo son recogidas muestras para la determinación de pH, acidez total, acidez titulable y alcohol probable.

### *II.3.6 Estatus hídrico del viñedo.*

#### *II.3.6.1 Área foliar y riego.*

En los viñedos, el potencial total de uso de agua varía según condiciones climáticas y el tamaño de la canopia de las vides. De esta forma, la alteración del tamaño y forma de la canopia por labores de manejo puede modificar el consumo de agua por parte de las vides, al modificarse la cantidad de radiación solar interceptada. Así también, cuando se considera el consumo de agua de una planta de vid en particular, con una canopia más grande, ésta tendrá una mayor cantidad de área foliar expuestas a las otras condiciones atmosféricas que dirigen el consumo de agua (viento, humedad relativa, temperatura), y por lo tanto esta planta presentará un mayor consumo de agua.

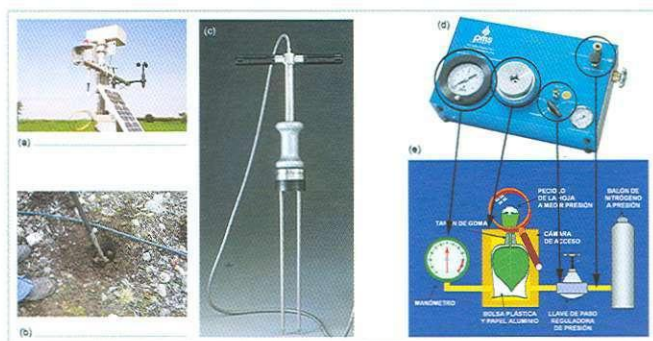
Así, cuando se estima el consumo de agua por parte de un viñedo, es necesario cuantificar la proporción del terreno cubierto por el follaje. En este sentido, las condiciones de crecimiento de la canopia en la temporada, la presencia de enfermedades, el sistema de conducción y el espaciamiento, también influirán sobre el cubrimiento y el consumo de agua.

Como se verá más adelante, la estimación de la cantidad de canopia mediante sensores remotos es de gran utilidad para determinar el consumo real de agua en el viñedo, al tener una clara representación de la variabilidad espacial del tamaño de la canopia. Luego, el análisis en SIG de las condiciones de suelo permitirá realizar programaciones de riego considerando esta variabilidad intrínseca en el viñedo.

#### *II.3.6.2 Tecnologías asociadas a la determinación del estatus hídrico del viñedo.*

Las principales tecnologías asociadas a la determinación del estatus hídrico del viñedo, dentro del esquema de VP, se observan en la Figura 14, en donde se encuentran: (a) variables micrometeorológicas, en función de las cuales se puede determinar el consumo potencial de agua en el viñedo, lo cual debe ser ajustado según parámetros de planta, como el NDVI; (b) variables de suelo, en donde se emplean muestreos de suelo, con análisis gravimétricos en labo-

ratorio y (c), muestreo de variables de planta, en donde actualmente destaca el uso de la bomba Scholander, para la determinación del potencial xilemático, la cual se presenta en la Figura 14 d y e (equipamiento y esquema de funcionamiento, respectivamente). La determinación de estas variables en VP (exceptuando el caso de mediciones micrometeorológicas), son desarrolladas siguiendo criterios similares a los que se siguen para el muestreo de madurez de fruta, es decir, principalmente en función del IAF como variable integradora, pero considerando también otras características del viñedo, tales como distribución de características de suelo y topografía del terreno.



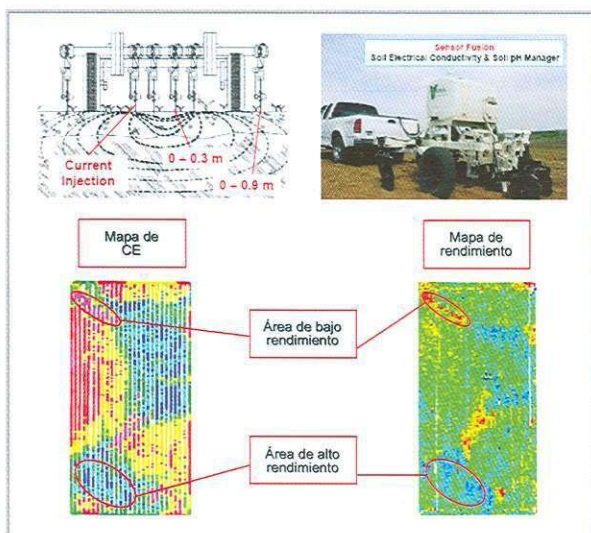
**Figura 14.** Tecnologías asociadas a la medición del estatus hídrico del viñedo en donde se muestra (a) mediciones micrometeorológicas; (b y c) mediciones de suelo, con muestreos de suelo y sonda TDR; (d y e) mediciones en planta, con equipamiento de Bomba Scholander y esquema de funcionamiento.

## II.4 Mediciones de propiedades de suelo

Un conjunto de variables muy importante, corresponde a aquellas relacionadas con el suelo. Los métodos implementados no corresponden a sensoramiento remoto, pero sí pueden ser adquiridos en terreno, haciendo uso de equipamiento especializado. Éstos pueden llegar a generar una densidad de muestreo suficiente (Figura 15), que permita representar en un mapa, de manera precisa, la variabilidad de los suelos en cada cuartel.



Una de las variables de suelo que se ha visto más relacionada a la variación en la calidad y rendimiento en las viñas, ha sido la de conductividad eléctrica del suelo. Esta variable se puede medir con un equipamiento especial como la Rastra Veris, con cuya información se pueden realizar planos de CE como el mostrado en la Figura 15.



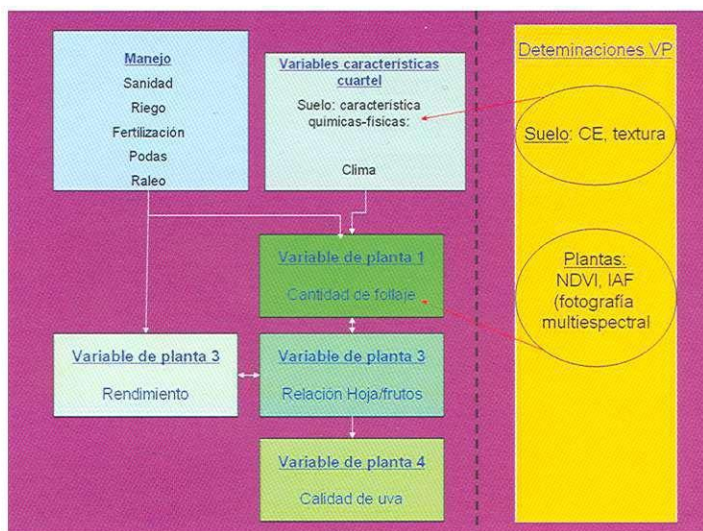
**Figura 15.** Plano de conductividad eléctrica de un viñedo desarrollado utilizando equipamiento Veris. (Adaptado desde Lund et al. and Adamchuk, 2005).

Como será mostrado en el próximo capítulo, esta información es incorporada como una variable explicativa importante en los esquemas de predicción de calidad y rendimiento del viñedo, en conjunto con las determinaciones de NDVI.

## II.5. Resumen de los elementos de VP

En la Figura 16 se puede apreciar las relaciones entre variables de manejo, variables características del cuartel y su influencia sobre la variabilidad de las plantas y el rendimiento y calidad de la fruta obtenidas en éstas. Las determi-

naciones en VP para la implementación de un manejo de sitio específico, están vinculadas a las determinaciones de suelo (a través de las mediciones de la conductividad eléctrica, las que son desarrolladas en alta densidad con el sistema de rastra VERIS y muestreo dirigido en el caso de la textura) y de plantas, relacionadas, a su vez, a la estimación de la cantidad de follaje. La utilización de esta información en conjunto con aquella de rendimiento (cuyos muestreos también son dirigidos, en relación a la variabilidad de follaje) permiten la determinación de la relación hoja/frutos, y, con ello, una estimación inicial de la calidad de la uva obtenida y la modificación ulterior de las actividades bajo el contexto del manejo de sitio específico (manejo en general y cosecha diferenciada).



**Figura 16.** Resumen determinaciones mediante sensores en VP (franja amarilla). La utilización de esta información, en conjunto con las otras variables determinadas permite una adecuada caracterización del cuartel.

**CAPÍTULO III  
IMPLEMENTACIÓN  
DE ESQUEMA DE  
VITIVINICULTURA  
DE PRECISIÓN (VP)**

Autores

Stanley Best S.

Lorenzo León G.

Marcelino Claret M.

### **III.1 Estudio de caso a nivel de cuartel: Aplicación de VP en un viñedo comercial (Cauquenes)**

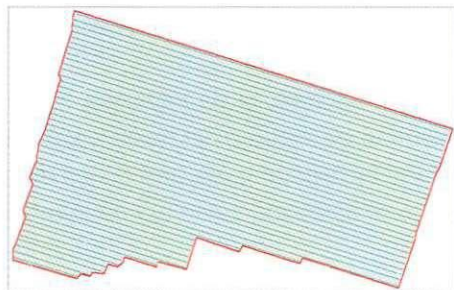
Incorporar el esquema de agricultura de precisión a un viñedo específico y utilizarlo dentro del sistema de manejo del mismo, significa seguir varios pasos en los que se permite incorporar cada uno de los elementos tecnológicos que permiten realizar un análisis adecuado del estado del viñedo.

El presente caso se ha desarrollado en una viña comercial, ubicada en el km. 10 de la ruta 128 Cauquenes-Parral, en la provincia de Cauquenes, VII Región de Chile. Esta viña corresponde a una empresa asociada al presente proyecto, que ha facilitado los medios para realizar los ensayos de campo propuestos en el mismo. La unidad productiva del presente análisis corresponde a un cuartel de 2,2 ha de la variedad Cabernet Sauvignon, en plena producción, las cuales están conducidas en espaldera simple, son regadas por goteo con emisores dispuestos a 1m. sobre la hilera. Dicho sistema de riego también es utilizado para realizar la fertilización del viñedo. Para los efectos del estudio, se escogió esta superficie dado que presentaba condiciones de mayor variabilidad espacial en las condiciones de suelo, en relación al resto de los cuarteles en el viñedo.

Los pasos seguidos para el análisis del cuartel, siguiendo la metodología de manejo sitio específico, se detallan en las próximas líneas.

#### *III. 1.1 Obtención de un SIG del área del viñedo.*

Con la ayuda de un receptor de señal satelital con corrección diferencial (DGPS), se capturaron las coordenadas geográficas de los límites del cuartel bajo estudio. Estas coordenadas fueron almacenadas en un capturador de datos de terreno (Hand Held), conectado permanentemente al sistema DGPS para construir un mapa digitalizado del perímetro del cuartel. En la Figura 17 se puede apreciar el resultado gráfico (mapa) de la georreferenciación de los contornos del cuartel y de las hileras del mismo.



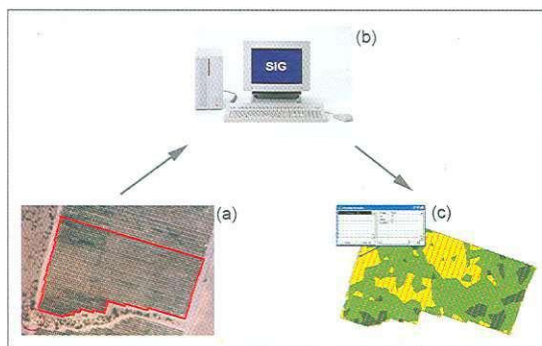
**Figura 17.** Contornos e hileras georreferenciadas del cuartel Cabernet Sauvignon, considerado en el análisis.

### *III.1.2 Ubicación geográfica de los centrales (postes de sustentación del sistema de conducción).*

Se eligió los centrales como puntos de referencia establecidos, por ser fácilmente ubicables por el personal en terreno, lo que facilita ostensiblemente las labores. Esto no ocurre así con el uso de puntos de referencia derivados a partir del empleo de GPS (ubicación basada sólo en torno a coordenadas geográficas), ya que en muchos casos se puede caer en ineficiencias operativas, y poca seguridad en la identificación de los puntos de interés. En la Figura 18 (c) se puede apreciar la constitución del mapa de la ubicación geográfica de los centrales en el cuartel bajo estudio, en donde a través de la aplicación de un SIG específico, se puede visualizar distinto tipo de información en cada central: ubicación coordenadas x e y corresponde a la información base, pudiéndose extender a información específica de manejo, niveles de vigor, rendimiento histórico en el área, etc.

### *III.1.3 Identificación de zonas homogéneas.*

En esta etapa se realiza la captura de la fotografía multiespectral, luego de lo cual se realiza un análisis geoestadístico especializado utilizando programas computacionales para análisis de la información de la imagen. De esta forma, se obtiene el NDVI y es asociado a la información geográfica de contornos, hileras y centrales del viñedo, con lo que se completa la construcción del SIG del viñedo.



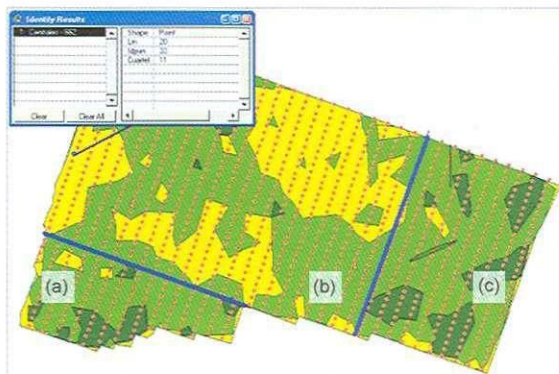
**Figura 18.** (a) Fotografía multiespectral aérea del viñedo; (b) procesamiento de la imagen; (c) SIG del viñedo mostrando los centrales e información asociada a cada uno de ellos.

En la Figura 18 (c) se pueden apreciar las áreas de vigor resultante del análisis de la fotografía multiespectral mostrada en 18 (a). Se pueden distinguir tres áreas de vigor en términos “relativos”, llamándose áreas de vigor alto (verde oscuro), medio (verde claro) y bajo (zonas amarillas).

Luego, es necesario tener una visión del vigor en términos “absolutos”, para lo que se requiere obtener un mapa del índice de área foliar del cuartel, es decir, en términos de  $m^2$  de hoja por  $m^2$  de suelo. Lo anterior será analizado más adelante.

#### III.1.4 Sectorizaciones.

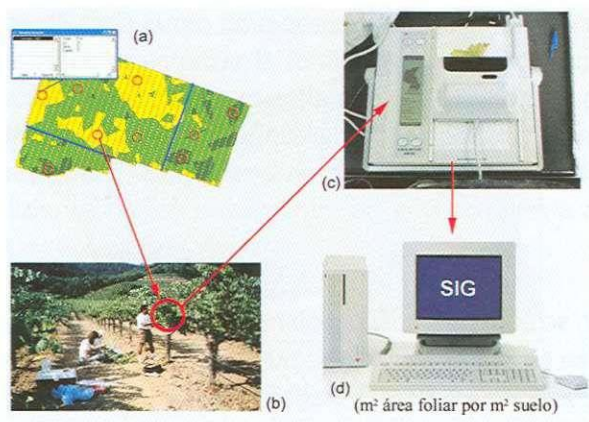
Si bien es cierto que, en este caso no se hicieron sectorizaciones comerciales pues correspondía a un estudio basado en parcelas experimentales, la cosecha potencialmente se pudo haber diferenciado de varias maneras, como muestra la Figura 19, donde se muestra un criterio simple de sectorización, en base a la elección de lotes que presenten vigor medio – bajo y medio – alto según el índice de NDVI. Como se aprecia en esta figura, el cuartel queda dividido en tres sub áreas de manejo y cosecha diferenciada.



**Figura 19.** Sectorización potencial en base a criterio de producción en el cuartel, mostrando sectores (a) y (c) con vigor medio – alto y (b) con vigor medio-bajo.

### III.1.5 Determinación de índice de área foliar (IAF) y puntos de muestreo.

Para la determinación del IAF en el cuartel, se asoció los valores de NDVI a valores de área foliar para puntos específicos muestreados en función de los niveles de vigor relativos alcanzados en el viñedo. De esta forma, se pueden correlacionar ambas variables y construir mapas de índice de área foliar absoluto. Esta secuencia se explica en la Figura 20, en donde, sobre el mapa de NDVI ya obtenido, se asignan puntos de muestreo en cada área de vigor. Posteriormente, se realiza una defoliación de 1 m lineal en cada punto y se determina el área foliar real, con lo cual puede ser obtenido un mapa interpolado del área foliar  $m^2$  de hojas/ $m^2$  de suelo), a través de un análisis empleando SIG.

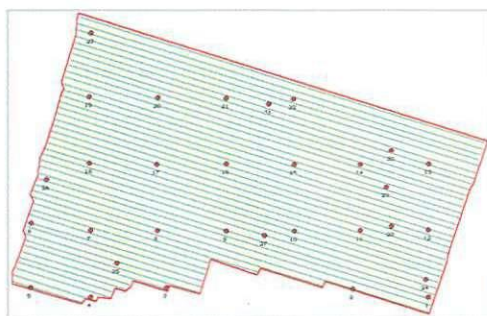


**Figura 20.** Diagrama de obtención del IAF (a) Mapa de NDVI; (b) defoliación de 1 m lineal en cada punto de muestreo; (c) determinación del área foliar asociada a cada punto; (d) construcción de un mapa interpolado del índice de área foliar considerando los puntos de muestreo.

El uso de las imágenes multiespectrales y su posterior análisis, han permitido un mejor entendimiento de la variabilidad, tanto en la parte vegetativa como en la productiva. La integración de la información recopilada en terreno y la producción de los vinos, han presentado altas correlaciones.

Con la obtención del mapa de NDVI e IAF se pudo determinar con mejor propiedad los puntos a ser monitoreados. En tanto, esta elección se basa sobre una variable integral de planta, como lo es el volumen foliar desarrollado. El uso de sistemas de monitoreo hace posible una mejor sectorización que permite realizar un muestreo dirigido, obteniendo una reducción en mano de obra necesaria para realizarlo y, además, una probabilidad mayor de éxito de la representación de la variabilidad del área a trabajar. En la Figura 21, se muestra la distribución definitiva de puntos en el cuartel desarrollada para fines de este estudio.





**Figura 21.** Distribución final de puntos de muestreo en el cuartel, considerando las áreas de vigor derivadas del análisis de NDVI.

En la Figura 21 se observan puntos de monitoreo de variables del estudio en cultivos sin embargo, en el caso de una explotación comercial se ha visto que esta cantidad de puntos puede ser reducida ostensiblemente, y que el criterio puede ser el tomar tres puntos por categoría, lo que en el presente caso daría un total de nueve. Este criterio fue seguido en el caso de los muestreos de área foliar en el estudio (Figura 20), mientras que para el resto de las variables se continuó tomando una base de treinta y un puntos.

### *III.1.6 Monitoreos en terreno de variables de interés.*

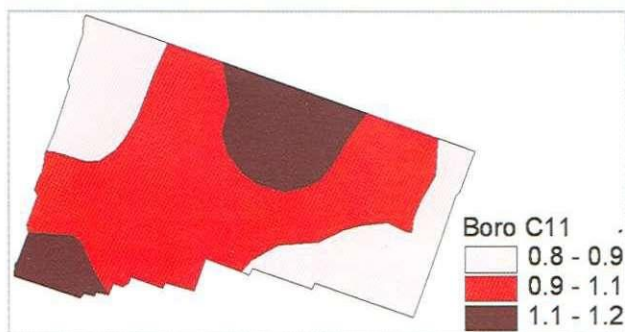
Los monitoreos se realizaron de acuerdo con la sectorización y los puntos de control ya elegidos. Lo anterior está orientado a realizar un adecuado análisis de las problemáticas de manejo que se presentaron en la viña, se realizó un diagnóstico de las siguientes variables de fertilidad: medición de estatus hídrico del viñedo; fenología de las plantas; calidad de uva antes de la cosecha; producción de uva y relaciones de equilibrio, las que serán detalladas a continuación.

### *III.1.7 Fertilidad.*

Con el fin de determinar el contenido residual de nutrientes en el suelo, se

tomaron muestras de suelo de los primeros 20 cm en la zona de influencia del emisor de riego de cada punto de muestreo. Las determinaciones realizadas sobre las muestras a caracterizar la fertilidad correspondieron a: acidez del suelo medida como valor de pH; materia orgánica; Fósforo disponible; Nitrógeno inicial disponible; Calcio, Magnesio, Potasio, Sodio y Aluminio de intercambio; Azufre; Cobre, Zinc, Manganeso y Hierro; Boro disponible (Figura 22). Este análisis, se realizó anualmente, en la época previa a floración del viñedo.

Sobre la base de los resultados obtenidos, queda claro que se debe sectorizar para los puntos de monitoreo, ya que sino no se realiza de esta forma y los diferentes tipos de suelos son mezclados, es muy probable que el resultado de esta muestra no represente una información útil para calificar el efecto de los elementos, sino tan sólo una referencia para fertilización que puede o no tener un efecto. Una forma de sectorizar el monitoreo es el uso de los planos de vigor y toma de muestras. A modo de ejemplo, usando la metodología antes planteada, se pudo detectar un problema de cobre en el área de estudio, el cual tuvo efecto en el rendimiento obtenido.



**Figura 22.** Ejemplo de la Variabilidad Espacial del Boro (ppm) en el Cuartel 11 del estudio.

### III.1.8 Medición de estatus hídrico del viñedo.

Si bien se utilizaron sondas FDR para medir el estatus hídrico del suelo, se determinó que su utilidad para el seguimiento y manejo del riego no es tan efectivo como el uso de la Bomba Scholander. Así, se desarrolló la medición del potencial hídrico xilemático de las plantas en los puntos de muestreo, lo cual se efectuó semanalmente. En la Figura 23 se pueden apreciar distintos elementos de esta actividad. Ésta es una determinación de alta importancia, al ser el factor hídrico el que ha mostrado ser el de mayor influencia sobre rendimiento y calidad.



**Figura 23.** Medición del potencial hídrico en las hojas con Bomba Scholander; (a) selección de hojas; (b,c,d) cubrimiento de hojas con papel; (e) hoja lista para ser evaluada; (f,g) lugar e instrumento de medición, mostrado también en la Figura 14 y lectura del potencial hídrico de la hoja (h).

### III.1.9 Fenología de las plantas.

A partir de agosto, en prebrotación, se midió el estado fenológico de las plantas en el cuartel, basándose en la categorización de Eichornn-Lorentz. Las

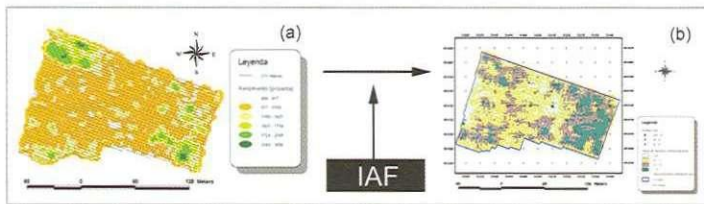
plantas de cada punto de muestreo fueron observadas semanalmente para establecer el estado fenológico promedio en cada cuartel, de tal manera de poder relacionar estos cambios a las determinaciones de manejo y variación en el cuartel en rendimiento y calidad.

### III.1.10 Calidad de uva antes de la cosecha.

Las determinaciones de calidad antes de la cosecha en los puntos de monitoreo se desarrollaron en base a la determinación de pH y acidez de la uva, y la medición refractométrica del contenido de Sólidos solubles en el campo (Figura 24).

### III.1.11 Producción de uva y relaciones de equilibrio.

Una información muy relevante ha sido la determinación de los equilibrios de área foliar con respecto a los rendimientos por planta (Figura 24b). Para la obtención de dicha información se utilizó el plano de información de rendimiento (Figura 24a) y de área foliar.



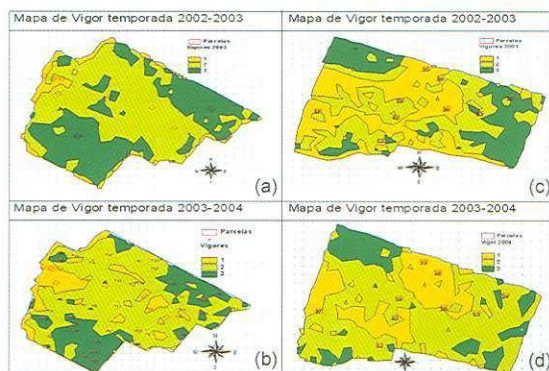
**Figura 24.** Plano de rendimiento (a), y obtención de plano de equilibrio (b), considerando el plano (a), en conjunto con la información de IAF obtenida.

Este plano de equilibrio es empleado como información de alta relevancia para la asociación de distintas zonas en el viñedo con la calidad de la fruta a ser obtenida.

### III.1.12 Determinación de cambios espacio - temporales.

Sobre la base de lo expuesto en el punto anterior se pueden determinar ajustes en el manejo, observando la variación interanual y asociándola a las con-

diciones climáticas de cada temporada. Esto se realiza al comparar los patrones de NDVI entre años (Figura 25) y la variación espacial en el cuartel, lo que constituye el denominado análisis espacio-temporal del viñedo.



**Figura 25.** Variación del plano de NDVI para dos temporadas consecutivas del cuartel bajo estudio.

### III.1.13 Calidad de mostos, vino y zonificación.

En los puntos seleccionados para cosecha se tomaron muestras compuestas de las plantas. De ellas se extrajo el mosto para realizar microvinificaciones. Se evaluó la calidad de los vinos mediante análisis de laboratorio y degustación. Posteriormente se relacionó la calidad de cada uno de ellos con las categorías de vigor (Figura 26).



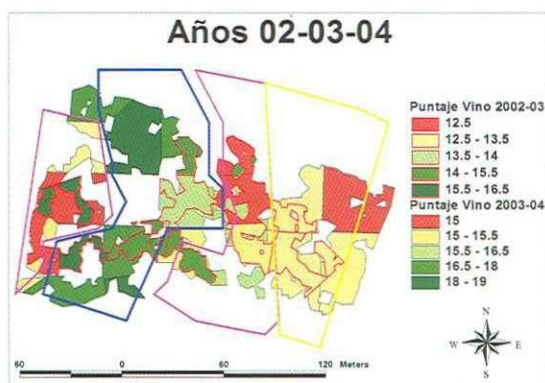
**Figura 26.** Asociaciones entre degustaciones de vino obtenido y puntos de monitoreo para distintas clases de vigor vegetativo.

Para el área de estudio se observó que en las zonas con alta relación  $m^2$  hojas/kg - fruta ( $> 1,5$ ), las plantas produjeron vinos de menor calidad, con lo que una mayor área foliar produjo un desequilibrio en los frutos, lo cual concuerda con lo expuesto en diversos estudios. Por otra parte, en las zonas con baja relación  $m^2$  hojas/kg - fruta ( $< 0,7$ ), también se produce uva asociada a vinos de menor calidad, lo que se asocia a la deshidratación de la fruta, produciéndose acidificaciones e inestabilidad del vino. En zonas en que existe una relación  $m^2$  hojas/kg-fruta media alta ( $1,2 - 1,4$ ), la calidad de los vinos es satisfactoria, pero no la mejor del sector. Finalmente, se pueden encontrar zonas con equilibrios óptimos, asociados a un rango de esta razón ( $0,7-1,2 m^2$  hojas/kg - fruta), factor de alta importancia para el manejo de los huertos en fertilizaciones, riego, podas, raleo de racimos entre otros factores. La alta relación obtenida puede explicarse debido a la alta asociación de la información de NDVI con los factores productivos que generan la expresión final en la planta, la que se traduce en la producción de uvas y finalmente en el vino.

En el estudio de caso realizado se presentó una diferenciación de áreas de calidad, que denota que las zonas de baja calidad de vino representan más del 50 % del área, vinos de calidad media un 20 % y de alta calidad un 30 %. Bajo esta perspectiva, en este cuartel existe una mezcla de calidades, en la cual las inferiores son las predominantes, produciendo una problemática importante cuando se cosechan uniformemente. En este cuartel, el principal factor que determinó la diferenciación en la calidad del vino fue el manejo

hídrico. Lo anterior indica que la utilización de imágenes multiespectrales para la segmentación de la variabilidad espacial, es altamente útil en la identificación de zonas con diferentes niveles de estrés hídrico.

En cuanto a la zonificación del cuartel bajo estudio, se tiene que al superponer los planos de calidad de vino del cuartel 11 (Figura 27), se puede visualizar claramente que existe una zona estable en lo que se refiere a la producción de buena calidad (azul) así como otra estable en producir baja calidad (morado). No obstante, existe una zona difusa que produjo vinos de mejor calidad y otros de menor calidad, acorde en los diferentes años que puede ser asociado a variables climáticas y manejos no acorde a éstas. Así, las zonas óptimas serían un sector que ya está en equilibrio. Sin embargo, las de baja calidad y difusas deben ser manejadas en forma diferente para poder potenciar la calidad, teniendo como base para el logro de esto monitoreos que permitan tomar decisiones correctas.



**Figura 27.** Zonificación del cuartel bajo estudio en función de los resultados de puntaje de vino obtenidos luego de tres temporadas de cosecha.

### III.1.14 Integración al sistema de gestión del viñedo.

Los pasos anteriores en el ámbito de manejo se deben finalmente integrar al sistema de gestión del viñedo, el cual, a su vez, debe integrar tanto lo económico como lo técnico - productivo. A lo largo del proyecto esta integración se ha traducido en recomendaciones a nivel de terreno de las variables que han resultado ser más determinantes para la producción y calidad. Tal es el caso

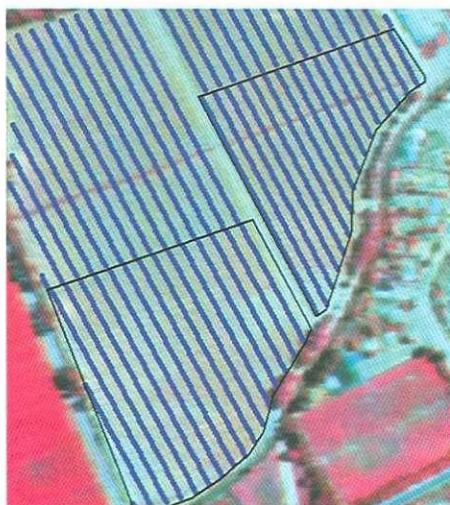
de la variable hídrica, en donde a través de un muestreo regular de las zonas de vigor en los cuarteles bajo estudio, el riego se dirigió siguiendo los criterios establecidos en el uso de índices de potencial xilemático. Queda como labor a seguir el incorporar el resto de la viña dentro de un esquema integral de manejo, en donde se propone un trabajo como el que será mostrado en el punto III.2., en donde además se integre la información espacio - temporal de zonificación mostrada en la Figura 26, en orden a establecer mejores criterios de manejo y cosecha.

### **III.2 Estudios de caso: "Extensión del proyecto al medio vitivinícola"**

En las siguientes páginas se mostrarán algunos de los elementos de VP ya presentados en el punto anterior, derivados del proyecto y que han sido empleados para incorporación de la tecnología en zonas amplias de viñedos de tipo comercial.

#### *III.2.1 Estudio de caso de viña comercial.*

En la Figura 28 se presenta una fotografía aérea multiespectral obtenida sobre cuarteles de un viñedo comercial.



*Figura 28. Fotografía multiespectral y georreferenciación cuarteles.*



La Figura 28 contiene información donde los tonos rojos representan la mayor cantidad de vegetación. Por otra parte, mediante SIG se han incorporado los límites georreferenciados de cuarteles y centrales existentes del viñedo, elementos de alta importancia para la ubicación de los lugares exactos de las labores a realizar dentro de los cuarteles.

En la Figura 29 se puede apreciar con más claridad el SIG desarrollado para estos cuarteles, en donde se incorpora la información asociada a cada central como su ubicación (coordenadas geográficas, hilera, número de central y cuartel). Esta información es luego entregada a personal en terreno para que se efectúen las labores de manejo necesarias en cada zona de los cuarteles.



**Figura 29.** Incorporación de cuarteles a SIG, en donde a cada central se asocia información (en este caso información geográfica e identificación) relativa a los muestreos en cada zona.

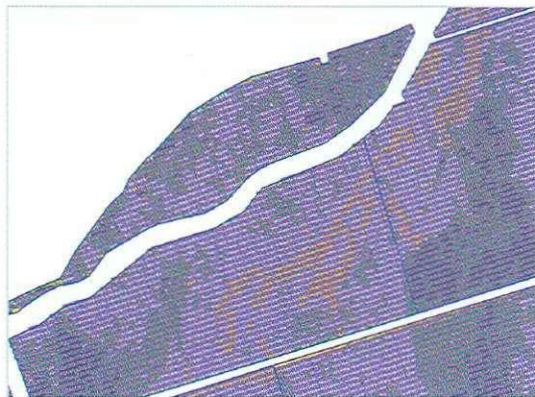
En la Figura 30 se puede visualizar un plano que muestra varios cuarteles de la viña. Nótese los claros patrones asociados a vigores medios y altos (tonos verdes). Se presentan los análisis de NDVI ya desarrollados para este sector de la viña (en tres categorías: alta (verde oscuro), media (verde claro) y baja (amarillo)). En esta figura los puntos rojos representan las zonas de muestreo para IAF, y conteo de frutos, según los criterios señalados en el punto II.3.3.1.



**Figura 30.** Plano de NDVI para los cuarteles incorporados a manejo sitio específico (con una clasificación en base a tres niveles de vigor: alto, medio y bajo), en donde se muestra puntos de muestreo (en rojo) asociados a cada zona de vigor.

Esta orientación en las técnicas de muestreo ha permitido aumentar ostensiblemente la capacidad predictiva del peso de racimos (y rendimiento final) a ser obtenido a cosecha, llegando a obtener altos valores de correlación ASC. Muestreos dirigidos a partir de este tipo de planos han sido la base sobre la que se sustentan distintos sistemas de pronóstico de cosecha puestos en marcha, utilizando el concepto de VP, en donde se han alcanzado correlaciones entre (entre 0,7 a 0,9), que han sido ostensiblemente mejores que aquellas obtenidas con los monitoreos tradicionales en los viñedos.

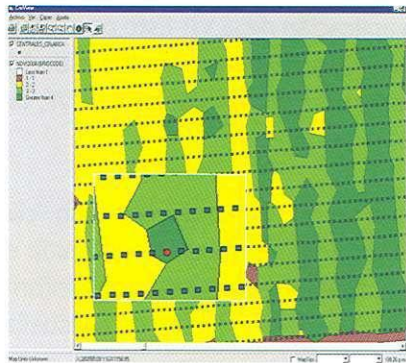
Finalmente, en la Figura 31 se puede apreciar una sección del viñedo donde se observa el plano de vigor con las centrales del viñedo, los que son utilizados, como ya ha sido mencionado, como sistema de orientación en las labores de manejo. Esto es organizado en un SIG de gestión del viñedo. Uno de los ejemplos de estos SIG será dado en el siguiente punto.



**Figura 31.** Visualización general de varios cuarteles en viñedo incorporados a sistema de información geográfica.

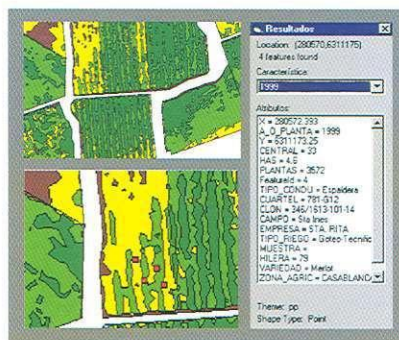
### III.2.2 Implementación del programa SIG para manejo del viñedo.

En el presente punto se hará una reseña del programa computacional CorView. Este programa SIG puede ser utilizado como una útil herramienta para el manejo de sitio específico en nuestro medio. La incorporación de un programa de estas características ha surgido de la necesidad de tener una interfase simple y robusta de visualización y ordenamiento de la información recopilada de un viñedo sobre una base geográfica, sin necesidad de recurrir a programas SIG convencionales, los cuales son altamente costosos, requieren de una preparación técnica específica y cuyas prestaciones exceden las necesidades que actualmente se presentan para el manejo de un viñedo bajo VP.



**Figura 32.** Puntos seleccionados en CorView que serán utilizados para tomar muestras específicas de un cuartel. Cabe señalar que esta sección corresponde a un acercamiento de la Figura 31.

En la Figura 32 se puede apreciar un acercamiento al plano mostrado en la Figura 31, utilizando el software CorView. Las funcionalidades de este software en cuanto a administración de datos, visualización y análisis, están ajustadas a los requerimientos empleados en AP. Lo anterior implica que dicho software puede reconocer archivos provenientes de SIG más tradicionales como ArcView (formato \*.shp, especialmente), con lo cual se pueden visualizar zonas de equilibrio y puntos de muestreo.



**Figura 33.** Visualización de los datos de puntos de muestreo consultados en CorView.

La incorporación de este software permite visualizar información estrechamente relacionada a la aplicación de la VP. Esto permite prescindir de softwares más evolucionados en SIG que poseen multiplicidad de funciones que, en definitiva, no serán empleadas por un usuario en VP, lo que además asegura su mejor comprensión.

Realizando una selección de grupos de puntos o un "clic" (sobre un punto en particular) se puede extraer la información contenida en dichos puntos para distintos análisis que implican el manejo de dicha información (como pronóstico de rendimiento y otros). Un ejemplo de esta visualización se aprecia en la Figura 33.

Cabe destacar que el software CorView estará a libre disposición a fines de 2006 para ser solicitado. Por otra parte, existen otros softwares de libre disposición tales como el ESRI ArcEXPLORER y el Pro Viewer de Map Infor, siendo ambos un completo programa SIG de fácil uso, que permite visualizar, exportar y realizar consultas a los datos almacenados en un SIG, para luego ser exportados, por ejemplo, en un mapa (éstos pueden ser descargados de la página del programa [www.progapinia.cl](http://www.progapinia.cl)).

## **CAPÍTULO IV ELEMENTOS DE ANÁLISIS CUANTITATIVO**

Autores  
Stanley Best S.  
Lorenzo León G.

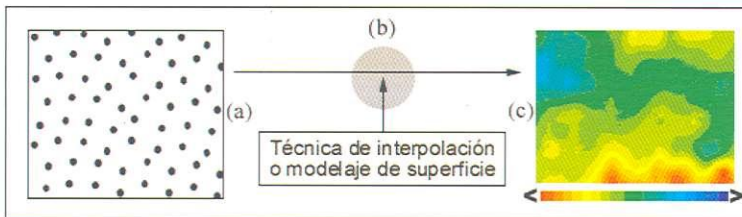
#### *IV.1 Geoestadística en VP.*

La utilización de los mapas ha sido tradicionalmente asociada a la ubicación de elementos en los mismos. Sin embargo, mediante los llamados SIG el punto de vista ha variado hacia el resolver problemáticas que surgen al intentar realizar asociaciones de tipo espacial. De esta manera, se han desarrollado distintas herramientas para evaluar las asociaciones espaciales. Éstas se caracterizan por poseer un enfoque cuantitativo, es decir, contestar en términos numéricos si una variable posee alguna especie de patrón espacial, de tal manera que pueda ser representada o asociada a otra(s) para, de esta manera, explicar el comportamiento productivo y de calidad de un cultivo en términos espaciales y temporales. Estas evaluaciones son la principal temática del área denominada "geoestadística".

Sin duda, la representación gráfica de los datos tiene claras implicancias en la capacidad de entender las posibles asociaciones que hay entre una determinada variable(s) y la calidad/rendimiento de un cultivo. De la misma forma, cuando ya se ha analizado la información, obteniendo determinados índices de asociación entre las variables y correlaciones de tipo espacial, la visualización de los datos en los mapas complementa dichos análisis desarrollados.

Ahora surge la siguiente interrogante: ¿cómo establecer en forma objetiva que una variable efectivamente presenta esta autocorrelación? En orden a responder esta pregunta se han desarrollado distintos índices cuantitativos que señalan estos grados de asociación espacial para las variables bajo estudio. Dentro de los índices más empleados se encuentra el "G" o de "Geary" y el índice "I" o de "Moran", los cuales serán detallados en este capítulo. De esta forma, en un mapa de estas características, se pueden establecer dichos test para visualizar asociaciones entre las variables explicativas los distintos parámetros de calidad y rendimiento del cultivo (correlaciones entre ellas) y el efecto final que se tiene para una o varias temporadas. Por otra parte, es necesario señalar que la relación entre la o (las) variable (s) explicativa (s) y las variables de rendimiento y calidad, no siempre son tan evidentes, por lo cual, para establecer dicha asociación es necesario usar metodologías geoestadísticas sofisticadas para poder evidenciarlas.

Es necesario destacar que una mayor densidad de datos de las variables bajo estudio, permite un análisis más consistente. La variable medida, dependiendo del factor en cuestión y la tecnología disponible, entre otras. Por lo anterior, es importante estudiar los métodos para la optimización de un muestreo discreto fundamentalmente en muestreos basados en puntos, escogidos según criterios tales como el NDVI. Así, se persigue que la organización de la información contenida inicialmente en estas formas discretas sean extendidas a mapas de superficie que caracterizan el espacio geográfico como un espacio continuo organizado en una que presenta una grilla continua (Figura 34c), a partir de un esquema de muestreo puntual (Figura 34a). El trabajo apreciado en la Figura 35 se denomina "modelaje de superficie", en donde se realiza un mapa de superficie mediante una técnica de interpolación o modelaje que representa una etapa intermedia (Figura 34b) de análisis entre los datos mostrados en grilla y aquellos finalmente representados en mapa de superficie que será analizado a continuación.



**Figura 34.** Ejemplo de variables ("x" e "y") cuyos valores representan una asociación espacial en el caso de "x", mientras que en (b) "y", presenta un patrón aleatorio de distribución de sus valores (basado en Lembo, 2005).

#### IV.2 Autocorrelación espacial.

Como se ha señalado anteriormente, es importante saber si los datos de una variable poseen algún grado de agrupación espacial o autocorrelación. De esta manera, la autocorrelación puede ser definida como la "correlación de una variable con respecto a sí misma a través del espacio". Así, si existe cualquier patrón sistemático en la distribución espacial de una variable, se dice que esta "espacialmente autocorrelacionada" (ejemplo, variable determinada en Figura. 35).



Por otra parte, si tenemos una situación en la que las áreas adyacentes o vecinas son más parecidas, entonces podemos referirnos a "correlación espacial positiva". Por el contrario, si encontramos que los valores de áreas vecinas no son parecidas, se habla de "autocorrelación negativa". Finalmente, si la variable bajo estudio muestra un patrón aleatorio, no existe autocorrelación espacial.

El índice "I" de Moran corresponde a uno de los indicadores más antiguos de autocorrelación espacial. Aún en la actualidad corresponde al índice estándar para la determinación de autocorrelación espacial. Esta es aplicada a zonas o puntos con variables continuas asociadas dentro de estas zonas. Una de las particularidades de este índice corresponde a que compara el valor de la variable en cualquier punto, con el valor de todas las otras posiciones.

El índice "I" de Moran, varía entre  $-1,0$  y  $+1,0$ . Si existe una correlación espacial, los valores estarán cercanos a la unidad (positiva y negativa con valores cercanos a  $+1$  y  $-1$ , respectivamente), mientras que si no existe correlación espacial los valores del índice serán próximos a cero.



**Figura 35.** Ejemplo de variables ("x" e "y") cuyos valores presentan (a) una asociación espacial en el caso de "x" (Moran  $I > 0$ ), mientras en (b) "y" (Moran  $I = 0$ ) presenta un patrón aleatorio de distribución de sus valores. Figura modificada desde (Arthur J. Lembo, Jr. Cornell University. Curso de Geoestadística. Lectura No 9. Spatial Autocorrelation).

En la Figura 35 el valor de cada variable ("x" e "y") se encuentra asociado a un polígono, el cual muestra un color para un rango representativo de la variable. Se puede observar que en la figura 35(a) existe una correlación espacial positiva para la variable "x", mostrando valores de polígonos asociados espacialmente ( $I=0,66$ ); mientras que en la figura 35(b), no existe correlación espacial para la variable "y", mostrando los polígonos una configuración típica de "tablero de ajedrez".

Otro de los índices empleados corresponde al índice "C" de Geary. Este índice es similar al "I" de Moran. Varía típicamente entre 0 y 2. Si el valor de una zona en particular está espacialmente no relacionado con el valor en cualquier otra zona, entonces el valor del indicador será 1. Por otra parte, "C" está inversamente relacionado a "I". Asimismo, el test "I" proporciona un indicador más global, mientras que "C" es más sensible a las diferencias en zonas adyacentes.

#### *IV.3 Modelaje de superficie: interpolación espacial.*

Una vez obtenidos los índices de autocorrelación (a través de los test "I" o "C"), y habiéndose determinado que existe algún grado de asociación espacial en los valores de una variable estudiada, se pueden aplicar técnicas de modelaje de superficie para la o las variables de interés, lo que en este caso estará representado por la interpolación espacial.

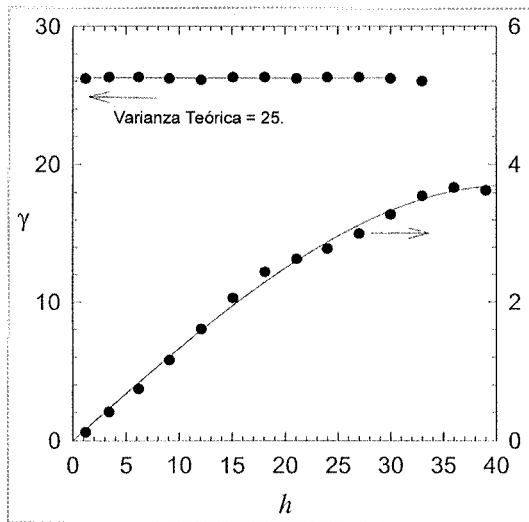
En esta sección se comenzará la descripción de las alternativas de análisis de modelaje para efectuar el paso mostrado en la Figura 34 (b). De esta manera, el proceso de llevar los puntos discretos a una representación de superficie, o modelaje de superficie, implica la obtención de un mapa a partir de un muestreo puntual (discreto) en un mapa que representa la distribución geográfica continua de los datos. La estadística espacial o geoestadística, por otra parte, utiliza los patrones geográficos de los datos para explicar de mejor forma su variabilidad.

#### *IV.4 Técnicas de caracterización de distribución de datos e interpolación espacial.*

Como ya se ha indicado, cuando se realiza un muestreo discreto, la estimación de los valores en aquellos lugares donde no se ha muestreado, implica el utilizar técnicas de interpolación, lo que finalmente nos lleva a la caracterización de la distribución de los datos en un mapa. Hay numerosas técnicas para caracterizar o modelar (interpolar) la distribución espacial implícita en un conjunto de datos, entre otras se cuenta con: la técnica "Nearest Neighbor" o del "vecino más próximo", en donde se asigna el valor del punto más cercano al lugar donde se requiere realizar la estimación; la "Inverse Distance to a Power—weighted" (o IDW) que corresponde al método más simple de interpolación, en el cual se realiza un promedio de las muestras en una ventana de resumen, de tal manera que, la influencia de un punto de muestreo declina con la "simple" distancia cuadrática, desde un valor desconocido hasta valores conocidos. Otros métodos utilizados corresponden al "Modified Shepard's Method"; "Radial Basis Function"; "Natural Neighbor—weighted"; el Método de Triangulación; Método de Curvatura mínima, y el Método de Regresión polinomial. En este método se ajusta una ecuación al set completo de puntos de muestreo (lo cual no es verdaderamente una interpolación, si no que un procedimiento de generalización de mapa).

#### *IV.5 Variograma.*

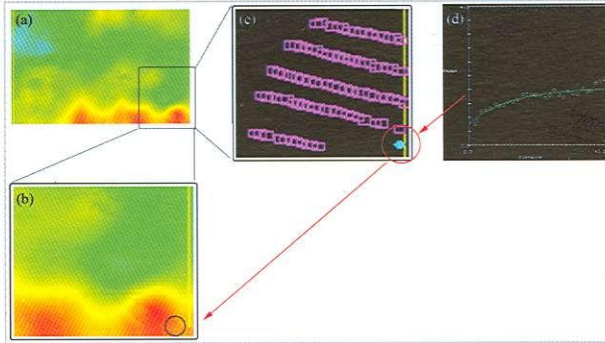
Una de las herramientas ampliamente utilizadas para la descripción espacial de los conjuntos de datos, corresponde al variograma o semivariograma. A su vez, este procedimiento geoestadístico es de gran importancia para la determinación de una de las mejores técnicas de interpolación utilizadas, la que corresponde al método kriging. El variograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos. Una representación gráfica típica de un variograma lo podemos observar en la Figura 36.



**Figura 36.** Representación de un variograma, en donde la varianza teórica del conjunto de datos es igual a 25. La curva ajustada minimiza la varianza de los errores.

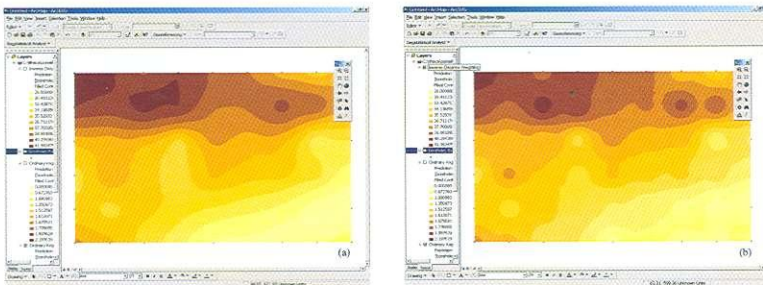
#### IV.6 Kriging.

Considerando los elementos antes descritos, una de las técnicas más empleadas para encontrar una interpolación de datos en aquellos puntos en donde no hay información, corresponde a la técnica del "Kriging". En la Figura 37 se presenta un esquema de la obtención de un mapa por medio de kriging, utilizando un programa geoestadístico.



**Figura 37.** Proceso b de la Figura 34 en programa geoestadístico para aplicación de kriging, en donde (a) mapa definitivo obtenido mediante variograma; (b) zona considerada en análisis kriging para la estimación del punto en (calipso); (c) puntos considerados para la estimación del punto desconocido; (d), variograma para determinar los pesos de los valores que serán considerados en la interpolación final; (e) punto interpolado, zona ampliada del mapa. (Adaptado desde Minasny et al., 2005).

Como ya ha sido señalado, otro de los métodos de interpolación corresponde al IDW. Si se comparan los resultados entre los métodos de interpolación, tales como de IDW y kriging, tomando como base el mismo set de datos, se pueden observar diferencias como las que se muestran en la Figura 38.



**Figura 38.** Comparación del resultado de planos realizados mediante (a) kriging y (b) IDW.

De esta manera, según los resultados mostrados anteriormente, es posible señalar que: (a) el método de kriging aparece en su representación de los datos en el mapa (Figura 38a) con resultados más “naturales”, evitando el efecto “ojo de buey” que es observado alrededor de algunos puntos en el mapa desarrollado mediante IDW (Figura 38 b). Por lo tanto, la adecuada representación de los datos en un mapa de interpolación depende, en buena medida, de la técnica de interpolación escogida, la cual constituye el paso intermedio de la Figura 34.

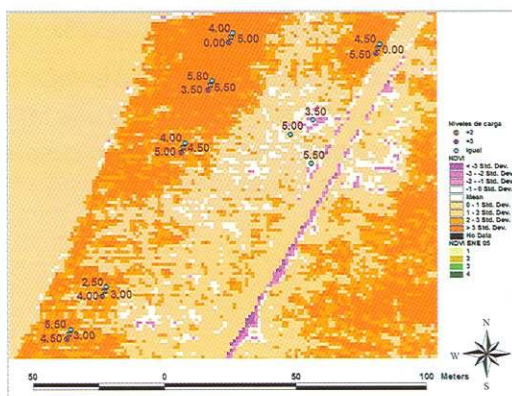
## **CAPÍTULO V**

### **ESTUDIO DE RENTABILIDAD**

Autores  
Stanley Best S.  
Lorenzo León G.

A continuación se dará una reseña de las principales ventajas de la Vitivinicultura de Precisión en el aspecto económico a través de un ejemplo de una viña comercial. Para ello, es interesante comenzar un aspecto derivado de las relaciones de equilibrio al interior del viñedo. De no ser considerada la variabilidad de los cuarteles, se puede estar cayendo en reducciones ostensibles en la rentabilidad por hectárea.

En la Figura 39 se puede observar una prueba donde en cada nivel de NDVI se asoció un nivel de carga específica, dejando: (i) igual cantidad de racimos por planta; (ii) dos racimos extra y (iii) tres racimos extra. En cada punto se observa el puntaje final (enológico, en una escala de 1-6) de los vinos obtenidos en cada área de muestreo.



**Figura 39.** Mapa zona de ensayo estudio de rentabilidad, mostrando distintas parcelas de carga frutal ubicadas en diferentes zonas de vigor escogidas en función del índice NDVI.

Es importante notar que las calidades de vinos, según la evaluación enológica, tiende a ser similar en aquellas zonas de vigor alto y medio en las cuales se les dejó dos o tres racimos extra. Esto confirma lo señalado en el punto II.3.4. (Mapas de equilibrio), en el sentido que las plantas localizadas en dichos sectores de vigor medio o alto, alcanzan su equilibrio con cargas mayores, y, por lo tanto, los puntajes tienden a mantenerse o a ser mayores, en tanto no aparecen factores



negativos en la degustación como corresponde a sabores herbáceos. Por otra parte, en el siguiente cuadro se realiza un análisis comparativo de la producción obtenida para cada uno de las zonas de vigor y los tratamientos de cantidad de racimos mantenidos en la planta.

**Cuadro 1.** Evaluación económica del uso de carga diferencial del ensayo realizado.

Vigor	Has	Plant Area	Racimos Extra		Botellas Extra		Utilidad extra (US\$)	
			2 racimos	3 racimos	2 racimos	3 racimos	2 racimos	3 racimos
1	0.19	435	0	0	0	0		0
2	0.55	1265	0	0	0	0	0	0
3	0.44	996	1992	2988	181	272	181	272
4	0.31	705	1410	2115	128	192	128	192
<b>Total</b>	<b>1.49</b>	<b>3401</b>	<b>3402</b>	<b>5103</b>	<b>310</b>	<b>464</b>	<b>310</b>	<b>464</b>

*Si consideramos que las calidades son similares entre dejar dos o tres racimos más en las áreas de vigor medio y alto, tendremos una utilidad extra de 310 y 464 US\$ por hectárea, respectivamente, al tener en cuenta el mayor número de botellas obtenidas.*

## **CAPÍTULO VI DESAFÍOS DE LA AP**

Autores  
Stanley Best S.  
Lorenzo León G.

En función de los resultados de las investigaciones desarrolladas en el proyecto INIA-FIA y las tendencias del mercado del vino, surgen distintas líneas en cuanto a desarrollo de la Vitivinicultura de Precisión en nuestro país.

### *VI.1 Manejo de las relaciones hídricas en el viñedo.*

Lo anterior está en concordancia con la gran influencia que ha mostrado el estatus hídrico (EH) del viñedo sobre la variabilidad de la producción y calidad de la fruta. En este sentido, la evolución de las determinaciones del EH en los viñedos ha pasado desde las determinaciones basadas en suelo y micrometeorológicas, hasta aquellas basadas en micrometeorología y plantas como la determinación del potencial hídrico xilemático, dada su significancia fisiológica directa con el EH y su consistencia. Sin embargo, este tipo de determinaciones, aunque se desarrolle bajo un esquema regulado de muestreo (en base a zonas de equilibrio o NDVI), es muy exigente en mano de obra y tiempo. Por ello se requiere de una metodología basada igualmente en un aspecto fisiológico de la planta que varíe directamente con el EH, y que se pueda desarrollar en el mínimo tiempo, con una representatividad del viñedo tal, que se pueda hacer los manejos de riego en forma oportuna y con menor costo por reducción en la mano de obra requerida; sin embargo en la actualidad sigue siendo el mejor sistema utilizado e implementado por los viñedos. Para mejorar la eficiencia del uso de este sistema se debe considerar que los viñedos son regados homogéneamente. Por lo tanto, el monitoreo se debe focalizar en el área más importante en superficie del cuartel, de forma que se potencie la mayor cantidad de plantas con un manejo adecuado del riego. Por otra parte, se ha encontrado la determinación de índices de estrés hídrico, basado en la determinación de la temperatura de superficie del viñedo como una alternativa posible para estos fines. Sin embargo, este punto está en estudio y se verán sus resultados en los próximos años (Figura 40). En este método se trabaja en base a la determinación de los denominados "Índices de estrés hídrico de cultivo", (Jackson *et al.*, 1981; Jones; 2002), determinados según la siguiente relación:

$$CWSI = (dT - dTI) / (dTu - dTI)$$

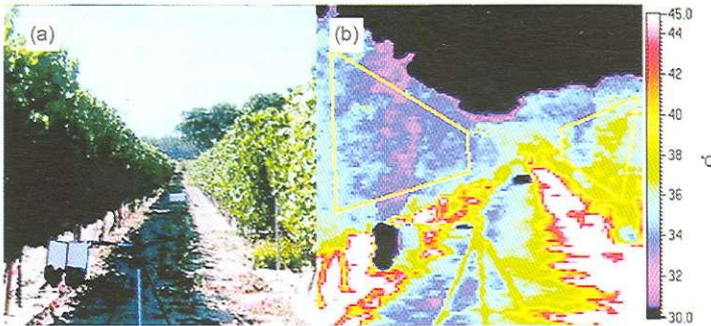
Donde:

$dT$ : es la diferencia entre el valor térmico de la canopia y del aire,

$dTu$ : diferencia entre límite superior térmico de una hoja (hoja no transpirando) y la temperatura del aire,

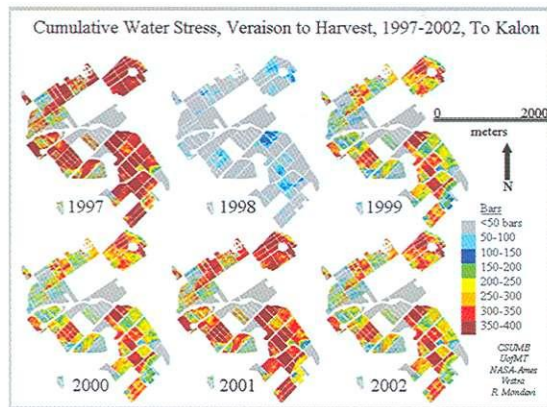
$dTi$ : diferencia entre límite inferior térmico de una hoja (hoja bien hidratada) y la temperatura del aire.

Se ha evaluado el CWSI con respecto a la transpiración en los viñedos, encontrando evidencia de buena relación entre estas variables estudiadas. En la Figura 40 se puede apreciar una fotografía termal del viñedo en relación a una fotografía normal.



**Figura 40.** Determinación de temperatura en un viñedo en espaldera (a) haciendo uso de una cámara termal, con lo que se obtiene una imagen en falso color que representa en escala cromática las distintas temperaturas en la canopia (Jones et al., 2002).

Por otra parte, se cuenta con modelos promisorios de simulación del estatus hídrico acumulado del viñedo (Figura 41), el cual puede ser asociado a las tecnologías antes descritas para la obtención de un diagnóstico mucho más preciso. De esta forma, puede relacionárselo mejor con la respuesta del mismo a los déficit hídricos, en orden a optimizar labores de manejo bajo un esquema de VP.



**Figura 41.** Secuencia de grados de estrés hídrico entre pinta y cosecha acumulado para distintas zonas en cada cuartel de una viña, según un modelo de simulación (Johnson. et. al., 2003).

## VI. 2. Manejo de agroquímicos en el viñedo en base a dosis diferenciales.

Lo anterior se fundamenta en la necesidad de cumplir con las exigencias de mercado en cuanto a reducir las cargas de pesticidas (aplicadas al follaje y herbicidas) en el viñedo, para lo cual se debe usar información pertinente del vigor vegetativo (altamente complementaria a los trabajos ya desarrollados en VP), con lo cual se puede dosificar las aplicaciones de pesticidas al follaje en función de dicho vigor. Lo anterior puede desarrollarse en términos prácticos mediante el empleo de dosificadores especializados, los que son programables en función de los planos de vigor de cada cuartel. Por otra parte, existe una nueva generación de sensores para la aplicación dosificada de herbicidas en los cuarteles, y que responden a criterios diferenciales según presencia de malezas en las distintas zonas de los cuarteles.



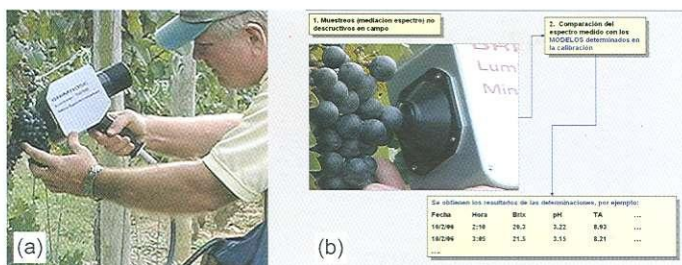
**Figura 42.** Aplicación diferencial de agroquímicos. (a) Herbicidas, utilizando equipo especializado para detección específica de malezas; (b) pesticidas al follaje, aplicación que es regulada en función de la cantidad de hojas haciendo uso de equipo mostrado en (c) para la programación de la aplicación. (Adaptado desde Taylor, 2004).

### VI.3 Monitoreo de calidad de frutos: equipamiento NIR.

En la actualidad, la espectroscopia infrarroja se ha comenzado a utilizar como una herramienta cuantitativa en distintas características de la fruta a ser cosechada. Su funcionamiento se sustenta en el desarrollo de calibraciones entre un análisis de referencia del compuesto medido en relación al espectro óptico del sensor NIR (Near Infrared por sus siglas en inglés). Un ejemplo del uso de este tipo de instrumentos, se encuentra en la cuantificación de distintas variables químicas para determinar la calidad de la uva a vinificar. Como será señalado, estas variables incluyen grados ( $^{\circ}$ ) Brix (baume), el pH, la acidez titulable, el contenido fenólico y el color.

En términos generales, la tecnología NIR posee las siguientes ventajas:

- Permite mediciones simultáneas para diferentes propiedades en solo segundo(s).
- Permite medir propiedades físicas y químicas.
- Es adecuada para una gran cantidad de tipos de muestras (sólidas, líquidas, gaseosas, etc.).



**Figura 43.** (a) Utilización de equipamiento NIR (Brimorse, mod. Luminar 6030) para determinación de características organolépticas de la uva; (b) esquema de captura de información mediante equipamiento NIR.

Muchos de los procedimientos analíticos tradicionales tales como color, fenoles, taninos y otros, son poco prácticos debido al tiempo necesario para desarrollarlos, o a los elevados costos de su realización, ser destructivos y realizar pocas muestras por fecha, por el tiempo de análisis requerido. Una forma de análisis químico indirecto es el uso de la espectroscopia NIR (con un previo procedimiento de calibración) que permite solucionar los problemas antes descritos.

## **CONCLUSIONES**



Un resumen de los beneficios derivados de la aplicación de la vitivinicultura de precisión al esquema productivo y de gestión de un viñedo, se detalla en las siguientes líneas.

- (i) Permite la realización de cosechas diferenciadas según el potencial de calidad de las uvas o su grado de madurez.
- (ii) Permite el direccionamiento de labores tales como poda, manejo de follaje, riego, etc; según las distintas áreas de vigor.
- (iii) Permite perfeccionar el monitoreo y sus resultados produciendo ahorros en cantidad de mano de obra requerida.
- (iv) Permite tomar decisiones en base a información precisa y oportuna, reduciendo el riesgo de errores en las decisiones.
- (v) Permite generar análisis espacio - temporales para un mejor entendimiento de los problemas productivos locales.
- (vi) La creación de iniciativas a nivel nacional en viticultura de precisión (tanto a nivel de proyecto, como programas de investigación), ha sido de gran importancia estratégica al poder evaluar e incorporar adecuadamente estas tecnologías. Dadas las proyecciones que se dan para esta área del conocimiento y técnica agronómica, es fundamental continuar con esta labor de investigación y desarrollo.
- (vii) Ha sido posible demostrar beneficios económicos en cuanto a retorno al productor, al tener la capacidad de diferenciar aquellas zonas en donde es posible mantener mayor cantidad de fruta por planta, sin comprometer la calidad de los vinos. Lo anterior se puede realizar con tanto con información relativa al equilibrio del viñedo, sobre una base de sitio específico. No obstante, es necesario establecer evaluaciones a nivel industrial en orden a validar los resultados obtenidos a nivel experimental.ivel industrial en orden a validar los resultados obtenidos a nivel experimental.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Adamchuk, V. I. 2005. The Philosophy of on - the - go soil sensing. First Asian on Precision Agriculture on [http://bse.unl.edu/adamchuk/presentations/acpa\\_2005.pdf](http://bse.unl.edu/adamchuk/presentations/acpa_2005.pdf).

Best; S. and L. León. 2005. Uso de herramientas de agricultura de precisión para optimizar la rentabilidad en huertos de pomáceas. En Proceedings 3º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão Embrapa Milho e Sorgo - Sete Lagoas, MG. 16-18 de agosto de 2005. CD-ROM.

Berry, J. K. 1999. The Precision Farming Primer: GIS Technology and Site-Specific Management in Production Agriculture. En:<http://www.innovativegis.com/basis/pfprimer> Published by Berry & Associates // Spatial Information Systems, Inc. (BASIS) Copyright by Joseph K. Berry ISBN pending Library of Congress Cataloging-in-Print Data.

Carothers, J. 2000. Imagery technology meets vineyard management. Practical Winery and Vineyard 21(1): 54-62.

Hall, A., D.W. Lamb, B. Holzapfel, and J. Louis. 2002. Optical remote sensing applications in viticulture: A review. Austr. J. Grape & Wine Res. 8:36-47.

Isaaks, E.H., and R. Mohan. 1989. An introduction to applied geostatistics. 561 p. Oxford Univ. Press, New York.

Iland, P.G., Botting, D.G., Dry, P.R., Giddings, J., Gawel, R., 1994. Grapevine canopy performance. In: Hayes, P. (Ed.), Proceedings of the ASVO Viticulture Seminar: Canopy Management, Mildura, Australia. Hyde Park Press, Adelaide. pp. 18–21.

Jackson, D. I. and P. B. Lombard. 1993. Environmental and management practices affecting grape composition and wine quality – a review. Am. J. Enol. Vitic. 44: 409-430.

Johnson, L.F., B. Lobitz, R. Armstrong, R. Baldy, E. Weber, J. DeBenedictis, and D. Bosch. 1996. Airborne imaging aids vineyard canopy evaluation. *Calif. Agriculture* 50(4):14-18.

Johnson, L.F., L. Pierce, J. DeMartino, S. Youkhana, R. Nemani, D. Bosch. 2003. Image-Based Decision Tools for Vineyard Management 12 p. Paper Number: 033129 An ASAE Annual International Meeting Sponsored by ASAE Riviera Hotel and Convention Center Las Vegas, Nevada, USA 27- 30 July 2003.

Kliwer, W. M., and R. J. Weaver. 1977. Effect of crop level and leaf area on growth, composition and coloration of "Tokay" grapes. *Am J. Enol. Vitic.* 22: 172 – 177.

Kaps, M. L. and G. A. Cahoon. 1986. Influence of leaf area adjustment, leaf position in relation to a basal cluster, and lower leaf shading on grapevine productivity. *HortScience* 21: Abstract N° 851.

Kaps, M. L. and G. A. Cahoon. 1992. Growth and fruiting of container – growth of Seyval blanc grapevines modified by changes in crop level, leaf number and position, and light exposure. *Am. J. Enol. Vitic.* 43: 191-199.

Lamb, D.W. & Bramley, R.G.V. (2001). "Innovations and technology - managing and monitoring spatial variability in vineyard productivity", *Nat.Res.Management. Australian Association of Natural Resource Management*, 4 (1): 25-30.

Lembo, A. Introduction to Geospatial Information Technology Course. Spatial Autocorrelation Dept. of Crop and Soil Sciences, Cornell University Lembo, A. Cornell University. Curso de Geoestadística. Lectura No 9. Spatial Autocorrelation en : <http://www.css.cornell.edu/courses/620/lecture9.ppt> (Noviembre 2005).

Lund, E.D., Mwolcott, G.P. Hansen. 2001. Applying nitrogen site-specificably using soil electrical conductivity maps and Precision Agriculture Technology. 2<sup>nd</sup> Int. Nitrogen Conference on Sci. and Policy, Potomac MD.

Minasny, B., McBratney, A.B., and Whelan, B.M., 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. (<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa>). (Noviembre 2005).

Nemani, R, L Johnson, M White. 2001. Adding Science to intuition: application of remote sensing and ecosystem modelling to vineyard management. Australian Grapegrower and Winemaker, 29th Annual Technical Issue: 45-47.

Pérez, D. 1997. Influencia de la carga frutal sobre el potencial productivo y calidad de la uva del cv, Ribier conducido en parronal sudafricano [Gable]. Tesis (Ing. Agr). Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía. Santiago Chile. 63 p.

Reynolds. A. G., and D. A. Wardle. 1989a. Impact of various canopy manipulations techniques on growth, yield, fruit composition and vine quality of Gewurztraminer. Am J. Enol. Vitic. 40:121 – 129.

Reynolds. A. G., and D. A. Wardle. 1989b. Effect of timing and severity of summer edging on growth, yield, fruit composition and canopy characteristics of the Chaunac. 2. Yield and fruit composition. Am J. Enol. Vitic. 40:299 – 308.

Smart, R.E. 2001. Good wines stem from balanced vines. Austr. & NewZealand Wine J.16(3):53-54.

Smart, 1995 Management of vigour and canopies in different environments. pp:3-6 Proceedings Canopy Management Viticulture Seminar, Mildura, Australia (ASVO: Glen Osmond) . Mildura, Australia.

Smart, R. E. 1982. Vine manipulation to improve wine grape quality. Proc. Int. Symp. Grape and Wine Cent. (Junio 1980 Univ. Of Calif., Davis) A. D. Webb (Ed) California, EU. p. 362-375.

Smart, R. E., J. K. Dick, I. M. Gravett, and B. M. Fisher. 1991. Canopy management to improve yield and quality. S. Afr. J. Enol. Vitic. 11:3 – 17.

Smart, R. E., J. B. Robinson, G. R. Due, and C. J. Brien. 1985a. Canopy microclimate manipulations for the cultivar Shiraz. 1. Definition of canopy microclimate. Vitis 24: 7 – 31.

Smart, R. E., J. B. Robinson, G. R. Due, and C. J. Brien. 1985b. Canopy microclimate manipulations for the cultivar Shiraz. 2. Effects on must and wine composition. *Vitis* 24: 119 – 128.

Taylor, S.A. 2004. Digital Terrois and Precision Agriculture: Investigations into the application of information technology in Australian Vineyards. PhD. Thesis. University of Sydney. 233 pp.

Wildman, W., Nagaoka, R. and Lider, L. 1983. Monitoring spread of grape phylloxera by colorinfrared aerial photography and ground investigation. *Amer. J. Enol. & Vitic.* 34:83-94.