

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS EN MECATRÓNICA Y
TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN



**TECNOLOGICO
DE MONTERREY®**

AGRICULTURA DE PRECISIÓN: EQUIPO DE CAMPO MÓVIL
INSTRUMENTADO PARA LA MEDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DE
VARIABLES AGRÍCOLAS INVOLUCRADAS EN LA PRODUCCIÓN DE
AGUACATE HASS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACIÓN

POR:

JORGE ALFREDO JIMÉNEZ SAHAGÚN

MONTERREY, N.L.

DICIEMBRE, 2008

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

DIVISIÓN DE MECATRÓNICA Y TECNOLOGÍAS INFORMACIÓN

**PROGRAMA DE GRADUADOS EN MECATRÓNICA Y
TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la presente tesis del **Ing. Jorge Alfredo Jiménez Sahagún** sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado académico de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACIÓN

Comité de tesis:

Dr. José de Jesús Rodríguez Ortiz
Asesor – ITESM Campus Monterrey

Dr. Enrique Aranda Herrera
Sinodal – ITESM Campus Monterrey

Dr. Eleazar Reyes Barraza
Sinodal – ITESM Campus Monterrey

Dr. Joaquín Acevedo Mascarúa
Director de Investigación y Posgrado
Escuela de Ingeniería – ITESM Campus Monterrey

Monterrey, N.L.

Diciembre 2008

AGRICULTURA DE PRECISIÓN: EQUIPO DE CAMPO MÓVIL
INSTRUMENTADO PARA LA MEDICIÓN Y DIAGNÓSTICO DE
VARIABLES AGRÍCOLAS INVOLUCRADAS EN LA PRODUCCIÓN DE
AGUACATE HASS

POR:

Jorge Alfredo Jiménez Sahagún

TESIS

Presentada al Programa de Graduados en Mecatrónica y
Tecnologías de Información

Este trabajo es requisito parcial para obtener el grado de Maestro
en Ciencias con especialidad en Automatización.

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS
SUPERIORES DE MONTERREY

Monterrey, N.L.

Diciembre 2008

© Copyright

Todos los derechos reservados para
Jorge Alfredo Jiménez Sahagún - Autor y Editor
Monterrey, N.L., México 2008

Prohibida la reproducción total o parcial en cualquier medio del texto, los procedimientos o resultados presentados sin autorización expresa del titular del derecho

Dedicatoria

A mis padres,
Ana Teresa y José Alfredo,
quienes con su ejemplo de vida y apoyo incondicional,
han colaborado siempre en la realización de mis metas,
sin importar cuán complicadas parezcan.

A mis hermanas,
Fabiola y Ana Tera,
por su constante optimismo ante el trabajo de tesis que he realizado.

A mi novia,
Cristina,
que con paciencia me ha acompañado a lo largo del estudio de mi maestría.

Agradecimientos

Al Tecnológico de Monterrey y al Departamento de Mecatrónica y Automatización del Campus Monterrey, por otorgarme una beca de docencia para poder realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. José de Jesús Rodríguez Ortiz, quien con su interés en el proyecto y excelente asesoría me ha guiado para concluir exitosamente mi trabajo de investigación. Gracias por creer en las ideas innovadoras de un joven estudiante.

A mis sinodales, el Dr. Enrique Aranda Herrera Ortiz y el Dr. Eleazar Reyes Barraza por optimismo hacia el proyecto de tesis, su invaluable aporte de conocimientos agronómicos y su continuo apoyo en el desarrollo de la tesis.

A Industrias Líder, empresa que a nombre de una sociedad de productores de aguacate del Estado de Michoacán, patrocinó en su totalidad el costo de la investigación.

A todos mis compañeros de trabajo y maestría, quienes en repetidas ocasiones me asistieron con sus conocimientos y materiales de trabajo.

Resumen

A pesar de que, en cierta medida, se utilizan diferentes prácticas agrícolas modernas para el cultivo del aguacate en Michoacán – sistemas de riego por micro-aspersión, monitoreos de fertilidad en suelo y agua, técnicas especiales de poda o estrategias de control de plagas – se cree firmemente que una mejora substancial de los niveles de producción puede ser lograda utilizando los principios de agricultura de precisión y haciéndolos aplicables al árbol del aguacate. Una posible forma de lograr este incremento podría ser el realizar una medición más completa, precisa y rápida de todas aquellas variables agrícolas que influyen de una forma u otra la producción de fruta de los árboles.

Con el objetivo de mejorar la precisión y ahorrar tiempo en las rutinas de campo en que se recolectan muestras e información de los árboles para propósitos de monitoreo, los principios de agricultura de precisión fueron utilizados y aplicados al diseño, selección e implementación de la instrumentación de un vehículo todoterreno que tiene la capacidad de realizar mediciones en un gran número de factores que influyen sobre la producción de aguacate. Diversos estudios (Tisdale & Nelson, 1988) han demostrado que existen ciertas variables cuya influencia sobre la producción es muy significativa. En el presente estudio, un vehículo John Deere TH6X4 fue adecuadamente equipado con sensores y medidores electrónicos, tarjetas de adquisición de datos, aplicaciones computacionales de monitoreo y georeferenciación basada en GPS (Geographic Positioning System), para lograr la recolección rápida y semiautomática de datos agrícolas relacionados con atmósfera que rodea al árbol de aguacate (dióxido de carbono, radiación fotosintéticamente activa, temperatura y humedad relativa), el suelo (potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, temperatura, humedad y muestras de suelo para el análisis de macronutrientes) y condiciones internas del árbol (nitrato, sodio y potasio en la savia y concentración de clorofila en hojas).

El nombre que recibió dicho equipo de campo móvil instrumentado para la medición y diagnóstico de variables agrícolas involucradas en la producción de aguacate hass es LAICS, por sus siglas en inglés Líder Avocado Investigation System.

El LAICS fue probado entre julio y agosto del 2008 en la huerta La Enramada, en Tingüindín Michoacán y demostró claramente que un vehículo todoterreno puede ser instrumentado para medir las variables agrícolas involucradas en la producción de aguacate sin comprometer la calidad y precisión de las mediciones. Se confirmó que el LAICS tiene la capacidad de detectar variaciones al medir árboles diferentes, unos de alta y otros de baja producción, y es por eso que puede ser utilizado para aplicar los principios de agricultura de precisión al cuidado de las huertas de aguacate. Además se comprobó que existen variaciones en las variables medidas para árboles diferentes; que en base a estas variaciones es posible realizar el diagnóstico comparativo de un conjunto de árboles de aguacate utilizando la aplicación de mapas GIS (Geographic Information System) desarrollada para el LAICS, y que ese diagnóstico puede apoyar a realizar un mejor control de cada árbol y de una huerta en su totalidad.

Índice

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos	II
Resumen.....	III
Lista de Tablas	2
Lista de Figuras.....	3
Glosario	5
Introducción	8
CAP1 – Factores Limitantes del Crecimiento y Variables a Medir	11
Variables Atmosféricas.....	11
Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR-Photosynthetically Active Radiation)	11
Temperatura.....	12
Humedad Relativa	12
Nivel de Dióxido de Carbono (CO ₂)	13
Variables del Suelo	13
Fertilidad	13
Temperatura.....	14
Porcentaje de Humedad.....	14
Conductividad Eléctrica.....	15
pH	15
Variables del Árbol	15

Cantidad de Nutrientes en Savia	15
Nivel de Clorofila en Hojas	16
CAP2 – El Árbol del Aguacate como un Sistema a Controlar	18
Lazo de Control Tradicional del Árbol de Aguacate	19
Enfoque de Agricultura de Precisión al Lazo de Control del Árbol de Aguacate	20
CAP3 – Selección de Componentes del LAICS	23
Sensores, Medidores y GPS.....	23
Radiación Fotosintéticamente Activa (LQS-70-10)	24
Temperatura y Humedad Relativa del Aire (TRH-100-50FT).....	26
Concentración de Dióxido de Carbono (CO ₂) del Aire (GMT 222).....	27
Nivel de pH del Suelo (IQ240).....	28
Humedad, Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura del Suelo (HydraProbell)	29
Muestreador Automático de Suelo.....	30
Concentración de Clorofila en Hojas (CCM-200).....	31
Nivel de Nutrientes en la Savia (C-122, C-131, C-141)	34
Posicionamiento Geográfico (GPS18@5Hz).....	35
Computadora, Dispositivos de Interface, Fuente de Poder, Software de Programación y Vehículo Todoterreno	35
Computadora Portátil (Toughbook CF-52).....	36
Tarjetas de Adquisición de Datos (NI-USB6008)	37
Fuente de Poder (AIMS 600)	37
Software de Programación (LabView y Matlab).....	38
Vehículo Todoterreno (Gator TH6X4)	39
CAP 4 – Integración de Componentes del LAICS.....	41
Agrupación de Hardware	41
Aplicaciones Programadas	44
Calibración de Sensores y Medidores	46
Filtrado de Señales para Sensores y Medidores Análogos.....	46
Curvas de Calibración para Sensores y Medidores	49
Validación de las Mediciones Realizadas Después de Calibrar	55
CAP5 – Pruebas de Campo	58
Selección de los Árboles.....	58

Árboles Ideales	58
Árboles Débiles.....	59
División de los Árboles en Cuadrantes.....	61
Procedimiento de Medición.....	62
CAP6 – Resultados y Discusiones	68
Características de los Datos Medidos y Almacenados por el LAICS.....	68
Valores de los Datos Medidos y Almacenados por el LAICS	70
Mapas GIS de Diagnóstico.....	71
CAP7 – Conclusiones Discusivas y Trabajo Futuro	76
Conclusiones Discusivas	76
Trabajo Futuro.....	77
Bibliografía y Referencias.....	78
APENDICE A – Muestreador Automático de Suelos.....	82
APENDICE B – Resolución de Sensores Análogos Evaluada dentro de la Computadora	83
APENDICE C – Sistema de Suministro de Energía del LAICS.....	85
APENDICE D – Errores y Soluciones de la Integración del Hardware.....	86
APENDICE E – Programación de Interfaces de Usuario en LabView	87
APENDICE F – Validación de la Calibración de los Sensores y Medidores del LAICS.....	91

Lista de Tablas, Lista de Figuras Y Glosario

Lista de Tablas

Tabla 1 - Evaluación de Errores Derivados del Ruido Eléctrico en Sensores Análogos Antes y Después de Filtrar	47
Tabla 2 - Validación de las Mediciones de los Sensores Calibrados del LAICS.....	56
Tabla 3 - Valores Promedio de las Variables de Interés Medidos en 13 Árboles de Aguacate Hass	69
Tabla 4 - Comparación de Resolución Análoga y Digital de los Sensores Análogos	83

Lista de Figuras

Figura 1 - Lazo de Control Retroalimentado (Ingeniería de Control).....	19
Figura 2 - Lazo de Control Tradicional para el Árbol de Aguacate en Michoacán	20
Figura 3 - Lazo de Control Moderno Propuesto para el Árbol de Aguacate	21
Figura 4 - Sensor PAR de Apogee Instruments. Modelo LQS70-10.....	24
Figura 5 - Respuesta a la Longitud de Onda del Sensor LQS-70-10	25
Figura 6 - Respuesta de los Sensores Li-Cor y Apogee para Iluminación bajo una Lámpara Iwasaki 6500K.....	25
Figura 7 - Sensor de Temperatura y Humedad Relativa del Aire de Pace Scientific.....	26
Figura 8 - Medidor de CO ₂ de Vaisala. Modelo GMT 222.....	27
Figura 9 - Medidor pH de IQ Scientific. Modelo IQ240	28
Figura 10 - Medidor Humedad, Temperatura y CE del Suelo de Stevens. Modelo HydraProbe II ...	29
Figura 11 - Calibración del HydraProbe II para Suelos Arenosos y Arcillosos	30
Figura 12 - Muestreador Automático de Suelo.....	31
Figura 13 - Medidor de Clorofila de OptiSciences. Modelo CCM-200	32
Figura 14 - Conversión de Unidades CCI-SPAD (arriba) y CCI- $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (abajo)	33
Figura 15 - Medidores de Nivel de en Savia de Horiba. Modelos C-122, C-131 y C-141	34
Figura 16 - Antena GPS de Garmin. Modelo GPS18@5Hz	35
Figura 17 - Computadora Portátil Robusta de Panasonic. Modelo Toughbook CF-52	36
Figura 18 - Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB6008 y Adaptador USB a 8 RS-232.....	37
Figura 19- Inversor de Voltaje AIMS600	38
Figura 20 - Vehículo Todoterreno de John Deere. Modelo Gator TH6X4	39
Figura 21 - Diagrama Esquemático de los Componentes del LAICS.....	41
Figura 22 - Proceso de Integración de Hardware del LAICS.....	43
Figura 23 - Aplicaciones Programadas para el LAICS	45
Figura 24 - Filtros Digitales Utilizados para Minimizar el Error por Ruido Eléctrico de los Sensores Análogos.....	48
Figura 25 - Curva de Calibración para el Sensor LQS70-10	49
Figura 26 - Curva del Calibración para el Sensor de Temperatura del THF-100-50FT	50
Figura 27 - Comparación de las Rectas de Calibración para el Sensor HIH-4000-004	51
Figura 28 - Curva de Calibración para el Medidor IQ240.....	52
Figura 29 - Diagrama de Selección de Curvas de Calibración del Sensor HydraProbe II.....	53
Figura 30 - Principio de Medición de Clorofila Utilizado por el Medidor CCM-200.....	55
Figura 31 - Validación de las Mediciones Realizadas por el LAICS (Medición de PAR)	56
Figura 32 - Árbol Ideal (derecha) y Árbol Débil (izquierda).....	60
Figura 33 - División de los Árboles en Cuadrantes de Medición.....	61

Figura 34 - Procedimiento de Medición del LAICS en Campo.....	64
Figura 35 - Procedimiento de Medición de Savia del LAICS.....	65
Figura 36 - Resultado del Análisis de Suelo del Árbol BU1 Realizado por el Laboratorio Ciclus.....	66
Figura 37 - Mapa GIS del Estado Actual del Valor de NO_3^-	72
Figura 38 - Mapa GIS de Diagnóstico para el NO_3^-	74
Figura 39 - Diagrama Esquemático de los Componentes del Muestreador Automático de Suelo...	82
Figura 40 - Sistema de Suministro de Energía del LAICS.....	85
Figura 41 - Detalle de la Programación de la Aplicación para Medir Variables del Aire y Suelo	88
Figura 42 - Detalle de la Programación de la Aplicación para Almacenar y Georeferenciar Todas las Variables Medidas.....	90
Figura 43 - Validación de las Mediciones Realizadas por el GMT-2222 (Medición de CO_2 en Aire) .	91
Figura 44 - Validación de las Mediciones Realizadas por el TRH-100-50FT (Medición de Temperatura y Humedad Relativa del Aire).....	92
Figura 45 - Validación de las Mediciones Realizadas por el HydraProbe II en Aire (Medición de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo)	92
Figura 46 - Validación de las Mediciones Realizadas por el HydraProbe II en Suelo (Medición de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo)	93
Figura 47 - Validación de las Mediciones Realizadas por el HydraProbe II en Agua (Medición de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo)	93
Figura 48 - Validación de las Mediciones Realizadas por el IQ240 (Medición de pH del Suelo).....	94

Glosario

%

%HR

Porcentaje de Humedad Relativa · 26, 47, 83

C

Ca

Calcio · 15, 23, 63, 69

CCI

Chlorophyll Content Index · 31, 32, 33, 54, 69

CE

Conductividad Eléctrica · 29, 69

CO₂

Dióxido de Carbono · 8, 9, 13, 14, 20, 23, 27, 46, 47, 54, 56, 62, 69, 70, 83, 87, 88, 91

G

GIS

Geographic Information System · III, 9, 23, 39, 41, 44, 46, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 89

GPS

Geographic Positioning System · III, 20, 23, 35, 37, 41, 71, 82, 89

I

ISFET

Ion Selective Field Effect Transistor · 28, 52, 55

K

K

Potasio · 16, 20, 23, 34, 50, 62, 63, 69, 70

K⁺

Potasio · 16, 20, 23, 34, 62, 70

L

LAICS

Lider Avocado Investigation System · III, 9, 11, 14, 19, 21, 22, 23, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 49, 51, 52, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 76, 77, 82, 85, 86, 87, 89, 91, 94

M

Mg

Magnesio · 15, 23, 63, 69

N

N

Nitrógeno Orgánico · 1, 23, 63, 69

Na⁺

Sodio · 16, 20, 23, 34, 62

NO₃⁻

Nitrato · 16, 20, 23, 34, 62, 70, 72, 73, 74

P

P

Fósforo · 23, 63, 69

PAR

Photosynthetically Active Radiation · 20, 23, 24, 46, 47, 49, 52, 56, 62, 69, 83, 87, 91

pH

Potencial de Hidrógeno · 8, 9, 14, 15, 19, 20, 23, 28, 29, 42, 43, 44, 47, 52, 55, 56, 62, 69, 71, 83, 91, 94

S

S-SO₄

Azufre · 23, 63

W

WAAS

Wide Area Augmentation System · 35

wvf

Water Volume Fraction · 29

Introducción

Introducción

Actualmente México es el líder productor, exportador y consumidor de aguacate (*Persea americana*) en el mundo. La cosecha nacional del ciclo 2006-2007 produjo 1,104,000 toneladas con un valor comercial estimado en \$8,980 millones de pesos, de la cual el estado de Michoacán contribuyó con un 96%. De la producción total del estado, 200,000 ton fueron exportadas a Francia, Japón, Corea, Estados Unidos y China, cantidad que representa el 23% de la producción del mercado internacional. El cultivo de aguacate en Michoacán genera 250,000 empleos directos bajo la supervisión de 22,000 productores, por lo que Michoacán es la región productora de aguacate más importante del mundo.

Aunque la producción de aguacate en el país parece muy alta, el rendimiento por hectárea (11.8 ton/ha) es en realidad muy baja si se compara contra la de países cuyos cultivos han sido tecnificados desde hace varios años, como es el caso de Israel, que tiene un rendimiento de 18.3 ton/ha (Hofshi, 2006). Esto sugiere que los factores limitantes del crecimiento relacionados con la producción de aguacate, no están siendo correctamente administrados y por lo tanto existe un área de oportunidad en este tema.

Varios trabajos de investigación enfocados a la producción de las plantas han demostrado que los factores limitantes del crecimiento más importantes –sin tomar en cuenta aquellos genéticos- son: temperatura del aire y suelo, humedad del suelo y del aire, nivel de pH (potencial de hidrógeno) y nutrientes del suelo, composición del aire atmosférico, estructura del suelo y cantidad y calidad de la luz (Dominguez V., 1996). Para el caso del aguacate, existen numerosos trabajos que han generado información sobre las relaciones entre la producción de fruta y las variables agrícolas mencionadas. Por ejemplo, Heath y Arpaia (2006) propusieron un modelo matemático que relaciona la humedad relativa del aire, la intensidad de la luz que incide sobre el árbol, la temperatura y concentración de CO₂ (dióxido de carbono) del aire con la asimilación y conversión de carbono realizada en el árbol; hay modelos tridimensionales de formas sugeridas en el follaje de los árboles para maximizar la luz incidente sobre ellos (Hadari, 2004); se han presentado revisiones sobre las recomendaciones del tipo de suelo apropiado y sus niveles nutricionales (Maldonado, Álvarez, Almaguer, Barrientos, & García, 2007) y también se ha investigado sobre mejores técnicas de irrigación para los árboles (Medina, Gomez, & Windler, 2003).

La agricultura de precisión, que mediante la utilización de tecnologías modernas de identificación y análisis con base en información temporal y espacial de campo, permite tomar decisiones de manejo de los cultivos de una manera mucho más precisa puede ayudar a maximizar el nivel de producción del cultivo del aguacate.

Agricultores de países altamente industrializados como los Estados Unidos de América han utilizado la agricultura de precisión para controlar, selectivamente –según lo requiera específicamente una zona del campo de cultivo–, por ejemplo, la aplicación de nitrógeno en

cultivos como maíz y sorgo, obteniendo incrementos en el valor de la producción, entre el 7.86 y el 60.51% (Watson, Segarra, Lascano, Bronson, & Schubert, 2005). Estas tecnologías se aplican también en diversa medida en viveros experimentales de aguacate en los EUA (Heath & Arpaia, 2006).

A pesar de que hay técnicas e información detallada sobre cómo mejorar la productividad de los árboles de aguacate, es necesario medir las variables agrícolas involucradas en la producción para tomar acciones correctivas en tiempo y forma. Es posible que las operaciones de campo conducidas por los agricultores del estado de Michoacán para monitorear dichas variables sean mejoradas con métodos más precisos, pues están fallando en dos aspectos técnicos críticos: 1.- se basan en la medición de uno o varios factores limitantes utilizando instrumentación y sensores estáticos, lo cual limita la capacidad de toma de decisiones óptimas puesto que no se puede medir la extensión completa de una huerta en un tiempo corto, y; 2.- en la mayoría de los casos, los productores no realizan una medición conjunta de todos los factores limitantes, esto es, solo miden uno o más; aquellos que son los que consideran más importantes o menos costosos.

Los objetivos del presente trabajo son demostrar: 1.- que un vehículo todoterreno puede ser instrumentado para medir las variables agrícolas involucradas en la producción de aguacate sin comprometer la calidad y precisión de las mediciones, 2.- que dicho sistema móvil de mediciones tiene la capacidad de detectar variaciones al medir árboles diferentes, de ésta forma puede ser utilizado para aplicar los principios de agricultura de precisión a las huertas de aguacate, y 3.- que un diagnóstico comparativo de un conjunto de árboles de aguacate en forma de mapas GIS puede ser sugerido por el sistema para cada una de las variables medidas.

La hipótesis es que haciendo uso de algunos principios de agricultura de precisión, y apoyándose en un sistema móvil instrumentado para medir simultáneamente datos de variables atmosféricas (CO_2 , radiación fotosintéticamente activa, temperatura y humedad relativa), variables de suelo (pH, conductividad eléctrica, temperatura, humedad y nutrientes) y variables del árbol (nutrientes en savia y concentración de clorofila), es posible predecir la condición de un árbol frutal con más rapidez, de tal manera que el agricultor en Michoacán pueda tomar medidas correctivas a fin de mejorar la productividad de un árbol de aguacate.

El nombre que se ha dado a la invención desarrollada en el trabajo de investigación es LAICS (Líder Avocado Investigation and Control System).

CAP1 – Factores Limitantes del Crecimiento y Variables a Medir

CAP1 – Factores Limitantes del Crecimiento y Variables a Medir

Los factores limitantes del crecimiento de una planta pueden ser divididos en: Genéticos y Ambientales.

Genéticos. El comportamiento de una variedad o híbrido está dictado por la influencia que los genes del organismo tienen sobre sus procesos fisiológicos, por eso, los altos rendimientos, la calidad de la producción, la resistencia a enfermedades, adaptaciones a sequías o temperaturas extremas son resultado en parte de las características genéticas de la planta. La constitución genética de la planta determina el nivel de crecimiento que esta puede alcanzar, sin embargo, ninguna condición circundante, ninguna sustancia favorable, puede ampliar esos límites cuando persisten otro tipo de factores limitantes.

Ambientales. El ambiente se define como la suma de todas las condiciones externas e influencias que afectan la vida y el desarrollo de un organismo (Tisdale & Nelson, 1988). Entre los factores ambientales que influyen en el crecimiento de la planta y que pueden ser modificados por el agricultor de diferentes formas y magnitudes, los más importantes son probablemente los mencionados en este capítulo. La interacción de estos factores con los genéticos determina finalmente como se desarrolla la planta.

Los factores genéticos son los más difíciles de cuantificar y modificar, debido a esto, en la investigación se trabajó únicamente con factores ambientales.

Todas los factores limitantes del crecimiento que se presentarán a continuación, son a su vez, las variables de interés que el LAICS mide utilizando un conjunto de sensores y medidores, y es por eso que además de ser mencionadas, se explicará brevemente la importancia de cada variable con la producción o el desarrollo de los árboles.

Variables Atmosféricas

Conjunto de condiciones que suceden alrededor e inciden directamente sobre el follaje del árbol de aguacate.

Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR-Photosynthetically Active Radiation)

La calidad, intensidad y duración de la luz que incide sobre las plantas es un conjunto sumamente significativo en el crecimiento y desarrollo de la planta, pues el catalizador de la fotosíntesis es precisamente la luz. En general en cuanto a calidad de la radiación recibida, lo más

satisfactorio para el crecimiento de las plantas es el espectro total de la luz solar, sin embargo solo ciertas partes de ese espectro son utilizadas para diferentes funciones, como es el caso de la fotosíntesis que utiliza únicamente las longitudes de onda de entre 400 y 700nm y es conocida como radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Whitmarsh & Govindjee, 2007).

La intensidad de la luz juega también un papel importante pues las plantas necesitan una cierta cantidad de energía radiante incidiendo sobre sus hojas, cantidad que depende del tipo de planta pero que en ningún caso puede ser nula.

La exposición de la luz también es de interés. La mayoría de las plantas no responden eficientemente a cambios bruscos en la intensidad de luz o a condiciones muy variantes, más bien necesitan exposiciones que aunque sean de baja intensidad sean prolongadas. El tiempo de exposición de las plantas a la luz se conoce como fotoperiodo y en base a él se clasifican las plantas en día corto, día largo o indeterminado; el fotoperiodo puede llegar a ser tan crítico que existen plantas que permanecerán en estado vegetativo (no florecen) por efectos del fotoperiodo (Whiting, Roll, & Vickerman, 2007).

Temperatura

La temperatura afecta directamente las funciones de fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la pared celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración, actividad enzimática y coagulación de las proteínas de la planta. Cuando la luz es un factor limitante, la temperatura tiene poco efecto en la fotosíntesis, pero si la luz no es un factor limitante, la fotosíntesis se incrementa por efecto de la temperatura. La respiración sucede más lentamente a temperaturas bajas (alrededor de 15°C) y se incrementa a temperaturas elevadas (alrededor de 40°C). La transpiración, que es la pérdida de agua de la planta a través de los estomas de las hojas, está directamente relacionada con la temperatura de forma similar a la respiración (Dominguez V., 1996).

Humedad Relativa

El agua se mueve de áreas con una humedad relativa elevada hacia áreas con humedad relativa baja. Dentro de una hoja, la humedad relativa entre las células se acerca al 100%. Cuando los estomas se abren, el vapor de agua dentro de la hoja sale de ésta formando una burbuja de alta humedad alrededor de los estomas en la parte externa de la hoja.

La diferencia en la humedad relativa alrededor de los estomas y el aire adyacente regula las tasas de transpiración y jala agua del suelo a través del xilema. La transpiración llega a valores máximos bajo condiciones atmosféricas cálidas y secas y/o bajo condiciones de vientos elevados. Cuando el abastecimiento de agua a las raíces es inadecuado, los estomas se cierran, la fotosíntesis se reduce y la planta puede marchitarse (Whiting, Roll, & Vickerman, Plant Growth Factors: Water, 2007).

Nivel de Dióxido de Carbono (CO₂)

De los gases que componen la atmósfera, el más importante para las plantas es el dióxido de carbono, ya que este se liga químicamente a las moléculas de la planta mediante la acción fotosintética, el cual en forma natural, es devuelto a la atmósfera como producto de la respiración de los animales, plantas (por la noche) y por la descomposición de residuos orgánicos derivada de la acción de microorganismos. El valor nominal del dióxido de carbono en la atmósfera es de alrededor de 380ppm (Whorf & C, 2005), sin embargo la concentración existente en el aire que rodea a las plantas puede variar debido a varias causas: cuando hay mucha luz (medio día) la acelerada actividad fotosintética demanda mucho CO₂, o en un espeso bosque la cantidad es también menor bajo el follaje de los árboles.

Cantidades superiores al valor nominal de dióxido de carbono en conjunto con altas intensidades de luz, ha demostrado el incremento en el desarrollo de ciertos cultivos como el tomate y la lechuga (Wittwer & Robb, 1964). Existe también correlación directa entre niveles elevados de dióxido de carbono y luz con una alta sensibilidad de la fotosíntesis a la temperatura.

Variables del Suelo

Conjunto de condiciones que suceden alrededor e inciden directamente sobre las raíces del árbol de aguacate.

Fertilidad

Todas las plantas, al igual que los seres humanos, necesitan de diversos elementos minerales para poder realizar sus funciones vitales, como crecer y reproducirse. Un suministro adecuado de elementos nutrientes minerales es necesario para la máxima producción agrícola, pero ellos por sí solos no pueden garantizar una cosecha abundante, ya que como se ha analizado, existen muchos y muy diversos factores limitantes que se interrelacionan entre sí y que evitan que ante una correcta fertilización, se obtengan resultados benéficos.

Las plantas obtienen los elementos esenciales de dos medios muy distintos: el aire y el suelo; por ello, el término nutriente vegetal se aplica específicamente a los elementos esenciales que la planta obtiene del suelo.

Los nutrientes vegetales esenciales para la planta se agrupan en dos categorías: macro y micronutrientes. Los macronutrientes son los nutrientes que se absorben en grandes cantidades y éstos a su vez se dividen en dos: macronutrientes primarios que son el Nitrógeno, Fósforo

y Potasio, y, macronutrientes secundarios que son el Azufre, el Magnesio y el Calcio. Únicamente los macronutrientes mencionados serán analizados por el LAICS.

Temperatura

La absorción de agua en la planta se ve afectada por la temperatura del suelo, pues la viscosidad del agua, permeabilidad de la membrana celular y actividad fisiológica de las células de la raíz (factores de la absorción), cambian con la temperatura.

La absorción de los elementos minerales también se ve afectada por efecto de la temperatura, por ejemplo, las bajas temperaturas retardan absorción de solutos, mientras que temperaturas muy elevadas la absorción de potasio se limita también (Worley, Blaser, & Thomas, 1963). La actividad microbica del suelo aumenta con la temperatura, como es el caso de las nitrobacterias; a su vez el contenido de microorganismos del suelo afecta directamente la composición del aire del mismo (relación $\text{CO}_2 - \text{O}_2$), la composición del aire afecta la respiración de las raíces y la respiración de las raíces afecta la absorción de nutrientes. El pH del suelo que afecta al desarrollo de la planta, también varía por efecto de la temperatura.

Porcentaje de Humedad

El crecimiento de la mayoría de las plantas responde eficientemente al contenido de agua presente en el suelo, siendo los niveles muy bajos o muy altos de humedad condiciones limitantes.

El agua es requerida por las plantas para la producción de hidratos de carbono, para mantener la hidratación del protoplasma y como vehículo para el traslado de alimentos y elementos minerales.

El nivel de humedad del suelo tiene también efecto en la toma de nutrientes de la planta. Mientras los poros del suelo están inundados por agua, se dificulta la respiración de la raíz y la toma de iones decrece. En su contraparte, si el suelo está muy por debajo de la capacidad de campo, no existe un móvil para la absorción de iones por lo que un incremento de humedad permite una mejor recepción de nutrientes.

La humedad influye también en el comportamiento de los organismos del suelo, los que a su vez influyen en el desarrollo de la planta. Niveles de humedad extremadamente bajos o altos inhiben la actividad de los organismos nitrificantes con lo que se reduce la cantidad de nitrógeno aprovechable.

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de un suelo puede servir para conocer algunas características físicas del suelo como el contenido de materia orgánica, contenido de arcilla y capacidad de intercambio catiónico. Las características mencionadas a su vez tienen un impacto considerable en la capacidad del suelo de retener agua y nutrientes, que son los factores de mayor peso en la producción del árbol.

Otras aplicaciones prácticas de las mediciones de conductividad eléctrica son el monitoreo y locación de la salinidad del suelo, o la medición indirecta de características químicas y físicas del suelo como la humedad, el Ca y Mg intercambiables, el ancho de la capa de arcilla del suelo y contenido de nitrógeno orgánico generado por el suelo (Šařec, Šařec, & Prošek, 2002).

pH

La reacción del suelo, o acidez del terreno (pH), puede afectar el crecimiento de la planta por su influencia en la eficacia de ciertos elementos necesarios para el desarrollo. Algunos ejemplos son la reducida actividad de los fosfatos en los suelos ácidos, altos en hierro y aluminio; la reducida actividad del magnesio en los suelos altos en materia orgánica que también son altos en pH; y la baja eficacia del molibdeno con la disminución del pH, entre otros. Cuando se aplica nitrógeno en forma amoniacal sobre una superficie con valores de pH superiores a 7.00, el exceso se perderá por volatilización por lo que la respuesta de la planta a la aplicación del nitrógeno será nula.

Variables del Árbol

Conjunto de condiciones que suceden alrededor e inciden directamente sobre los tejidos del árbol de aguacate.

Cantidad de Nutrientes en Savia

Las plantas requieren una cantidad adecuada de nutrientes a través de sus estaciones de crecimiento y producción para optimizar su desempeño en ambas, por lo tanto las concentraciones de nutrientes en el suelo deben mantenerse dentro de los niveles óptimos para cada cultivo. Sin embargo, el mantener un nivel de nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, cloro, etc.) óptimo en el suelo no necesariamente quiere decir que el árbol está siendo capaz de absorber esos nutrientes, en consecuencia, el árbol podría no alcanzar una concentración saludable de nutrientes en su savia afectando negativamente su desarrollo y producción. Más aún, mientras que las concentraciones de nutrientes del suelo pueden permanecer constantes por

semanas, la concentración de nutrientes en el árbol varía en cuestión de 3 días (Folegatti, Blanco, Marcelli, Boaretto, & Boaretto, 2005).

De la lista de nutrientes que se encuentran en la savia, únicamente se analizarán el nitrato (NO_3^-), sodio (Na^+) y potasio (K^+).

Nivel de Clorofila en Hojas

La clorofila presente en las hojas de las plantas está estrechamente relacionada con la condición nutricional de la planta, en especial con nutrientes que tienen relación con la fotosíntesis y síntesis de proteínas (nitrógeno, magnesio, potasio, hierro y azufre). Varios trabajos han demostrado la relación directa que existe entre la cantidad de clorofila que posee una hoja y la cantidad de nitrógeno de la misma, por lo que valores elevados de clorofila –que se traducen en valores elevados de nitrógeno– son recomendables. Una disminución del nivel de clorofila indicará entonces una carencia de nitrógeno que quizá se debe a una mala fertilización del suelo (Konica, 2003).

CAP2 – El Árbol del Aguacate como un Sistema a Controlar

CAP2 – El Árbol del Aguacate como un Sistema a Controlar

Un árbol de aguacate puede ser definido como un “sistema a controlar” desde el enfoque de la ingeniería de control, pues sobre él influyen un conjunto de variables que pueden ser manipuladas para lograr una producción óptima. Ciertas definiciones clásicas de control, y su relación con el árbol del aguacate, serán presentadas de acuerdo con Katsuhiko Ogata (2002).

Variable controlada: Es la cantidad o condición que se mide y controla y que normalmente es la salida del sistema. En este caso la variable controlada es la producción.

Variable manipulada: Es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Las variables manipuladas son las variables atmosféricas, de suelo y del árbol.

Controlar: Significa medir el valor de la variable controlada del sistema -y en ocasiones también el valor de las variables manipuladas- y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado.

Sistema: Un sistema es un conjunto de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto puede comprender sistemas físicos, económicos, químicos o biológicos. El árbol de aguacate es pues, un sistema que consta de un conjunto de órganos que actuando juntos, bajo la influencia de un conjunto de variables agrícolas, lleva a cabo un objetivo que es la producción de aguacate.

Perturbación: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida del sistema. El crecimiento vegetativo del árbol en condiciones de pH del suelo bajo es un ejemplo de una perturbación que modifica el valor de la producción de aguacate.

Control retroalimentado: El control retroalimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esa diferencia. Los valores de las variables de salida de un sistema se comparan contra valores preestablecidos como entradas de ese sistema y se realizan acciones que conlleven a igualar los primeros con los segundos.

En la Figura 1 se muestra el diagrama del lazo de control retroalimentado según lo describe la ingeniería de control.

Para que un sistema pueda ser correctamente controlado es de vital importancia no solo aplicar las acciones correctivas provenientes del controlador, es necesario que estas acciones sucedan en una magnitud suficiente y dentro de un tiempo adecuado. Por esta razón la retroalimentación juega un papel sumamente importante en un lazo de control, ya que sin la

existencia de uno o varios sensores capaces de cuantificar correctamente las variables del proceso y retroalimentarlas de forma oportuna hacia el controlador, éste último no podría llevar a cabo un buen desempeño. En el caso del árbol del aguacate,

Se considera que actualmente la retroalimentación que existe en los cultivos de aguacate del estado de Michoacán falla en varios aspectos que pueden ser mejorados con el LAICS.

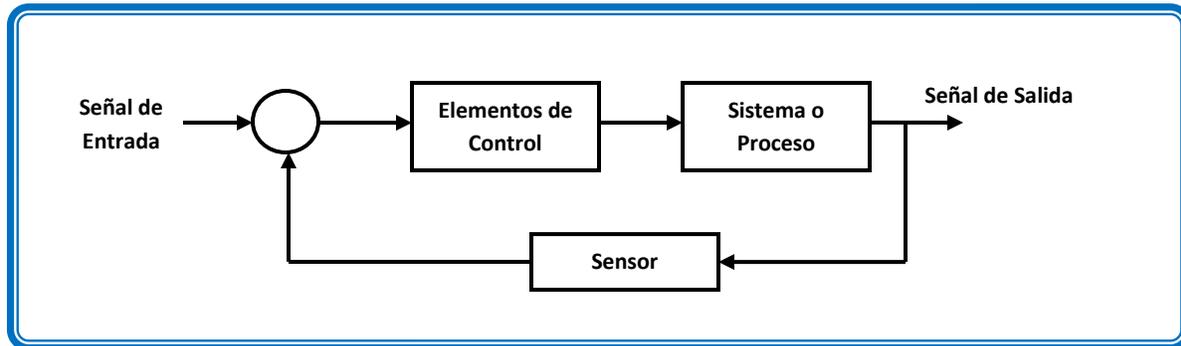


Figura 1 - Lazo de Control Retroalimentado (Ingeniería de Control)

Lazo de Control Tradicional del Árbol de Aguacate

Las operaciones de monitoreo de datos (retroalimentación del lazo de control) que tradicionalmente se llevan a cabo en una huerta tradicional siguen el siguiente patrón: 1.- Muestras de suelo y follaje son recolectadas cuando los árboles se encuentran en el estado fenológico de inflorescencia vegetativa (julio-agosto). Las muestras –cada una siendo el promedio de un área de 10 ha- son enviadas a un laboratorio privado donde se les realiza un análisis completo que comprende macro y micronutrientes para suelo y follaje; y pH, conductividad eléctrica y porcentaje de materia orgánica únicamente para el suelo. Ocasionalmente algunas mediciones de PAR son hechas en ciertas regiones de la huerta y por último datos ambientales de temperatura, humedad relativa y precipitación pluvial son obtenidos de estaciones meteorológicas de la región. 2.- Para cada una de las variables medidas un valor de referencia adecuado es propuesto por un técnico en base a sus conocimientos. 3.- Un cálculo diferencial (semi-manual) se lleva a cabo entre los valores de referencia propuestos y aquellos medidos en el campo, para que en base a los resultados, un conjunto de acciones correctivas (controlador), necesarias para incrementar la producción del árbol, sean sugeridas al agricultor.

En una situación optimista, las acciones realizadas por los agricultores beneficiarán las condiciones fisiológicas del árbol. Sin embargo, después de aplicar las acciones correctivas en la región de Michoacán, no se realizan más mediciones de retroalimentación por un periodo de seis o más meses, dejando abierto (no retroalimentado) el lazo de control durante mucho tiempo, tiempo en el que no se sabe a ciencia cierta lo que sucede con las variables medidas. La Figura 2 muestra la forma tradicional en que se lleva a cabo el control del árbol de aguacate actualmente.

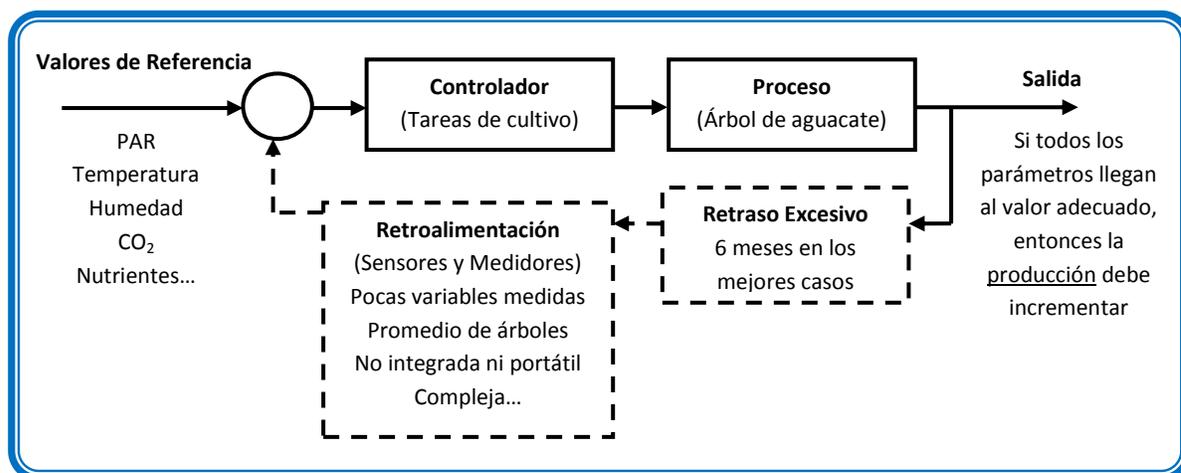


Figura 2 - Lazo de Control Tradicional para el Árbol de Aguacate en Michoacán

Enfoque de Agricultura de Precisión al Lazo de Control del Árbol de Aguacate

En palabras simples, el problema principal del lazo de control mostrado en la Figura 2 es: una mala retroalimentación.

La retroalimentación puede ser mejorada en gran medida siguiendo varios puntos clave que son derivados de los conceptos de agricultura de precisión, por ejemplo: realizar mediciones de un mayor número de variables involucradas en el proceso de producción; que las mediciones se realicen de forma integrada (varias a la vez) e individualmente para cada árbol, pues cada árbol es una entidad independiente de la otra; obtener los datos medidos en el campo de forma automática o semi-automática para agilizar el proceso de adquisición y evitar la confusión o extravío de información.

Para resolver el problema de retroalimentación, un vehículo todoterreno John Deere TH6X4 se equipó con sensores, tarjetas de adquisición de datos, software de monitoreo de información y un sistema GPS para realizar, de forma precisa, la adquisición semiautomática de las siguientes variables involucradas en la producción del aguacate: CO₂ atmosférico, radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura y humedad relativa que rodean el follaje del árbol, pH y temperatura del suelo, humedad, conductividad eléctrica y muestra del suelo para análisis de macronutrientes (Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Azufre, Magnesio y Calcio), nivel de NO₃⁻, Na⁺ y K⁺ en la savia del árbol y concentración de clorofila en las hojas. El principal propósito de este dispositivo es proporcionar a los agricultores una herramienta de trabajo capaz de medir el conjunto de variables mencionadas de forma rápida y precisa, permitiéndoles así tomar decisiones

de cultivo basadas en mejor información que actualmente, y así poder tomar las acciones correctivas necesarias en un tiempo oportuno (que será determinado en un futuro con ayuda del sistema de medición desarrollado para el LAICS). Con esto, es posible que el agricultor no solo ahorre dinero en el cuidado de sus huertas, sino que aumente sus niveles productivos.

La Figura 3 presenta la forma en la que se propone un lazo de control moderno para el árbol de aguacate, basado en agricultura de precisión, que funciona de forma mucho más eficiente que el lazo de control tradicional.

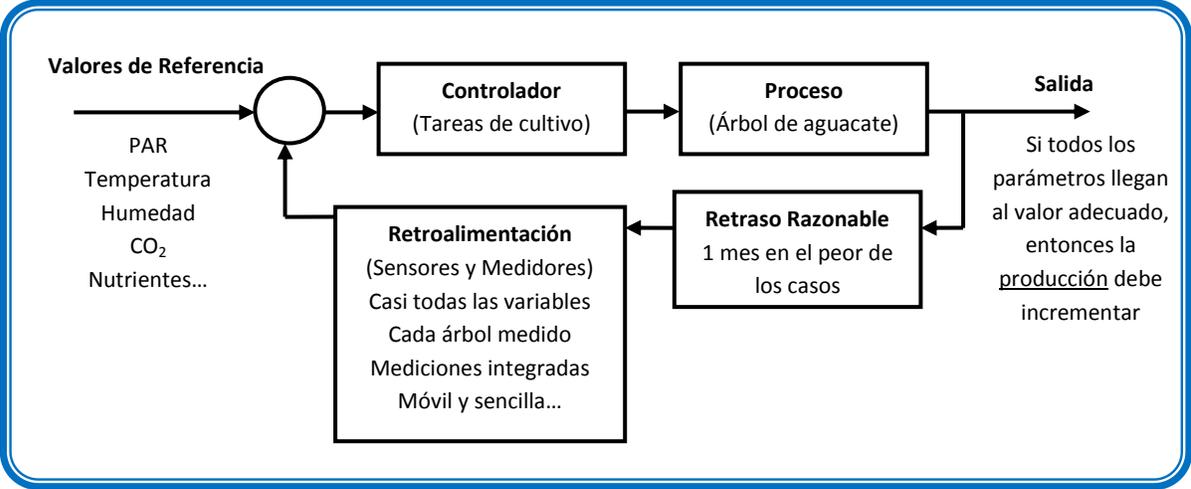


Figura 3 - Lazo de Control Moderno Propuesto para el Árbol de Aguacate

CAP3 – Selección de Componentes del LAICS

CAP3 – Selección de Componentes del LAICS

El sistema LAICS en su conjunto está compuesto por dos elementos principales: una unidad móvil integradora de mediciones, capaz de proveer retroalimentación precisa y confiable sobre las variables agrícolas que se pretende controlar; y, una aplicación programada en una computadora que se encarga de realizar la adquisición semi-automática de todos los datos medidos en el campo. La aplicación de software está también diseñada para realizar análisis de la información capturada y, mediante un cálculo comparativo contra valores de referencia adecuados, presentar un diagnóstico del estado del árbol en forma de mapas GIS.

Sensores, Medidores y GPS

Nueve dispositivos fueron adquiridos para medir cuatro variables atmosféricas: CO₂, PAR, temperatura y humedad relativa; cinco variables del suelo: pH, conductividad eléctrica, temperatura, humedad y muestras de suelo para análisis de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S-SO₄); cuatro variables del árbol: NO₃⁻, Na⁺ y K⁺ en la savia y concentración de clorofila en hojas; y posición geográfica: latitud, longitud y elevación.

Los criterios de selección aplicados a cada dispositivo fueron los siguientes: 1.- Cada dispositivo debe ser capaz de medir una o más de las variables de interés de forma precisa, rápida y portátil; de tal forma que los valores medidos puedan ser utilizados para realizar un control oportuno del árbol. 2.- Cada dispositivo debe contar con una forma sencilla de conectarse con algún tipo de sistema de adquisición de datos, para así poder ser interfaceado con una computadora laptop que irá guardando la información proveniente de los sensores en una base de datos, datos con los cuales se presentarán los mapas GIS de diagnóstico. 3.- Todos los dispositivos en su conjunto deben tener un costo total de menos de \$200,000MN para que su costo beneficio sea reflejado rápidamente al productor y que si llegasen a fallar, puedan ser remplazados fácilmente. 4.- Cada dispositivo utilizado debe haber sido utilizado al menos por un investigador internacional en un trabajo reciente y para una aplicación relacionada con la agricultura o similar. 5.- Todos los dispositivos de medición utilizados tendrán un método de calibración que garantice la precisión de los valores medidos, y/o tendrán una calibración garantizada por el fabricante.

A continuación se detalla la información más relevante de cada uno de los dispositivos de medición utilizados, junto con una breve comparación contra aquellos dispositivos que aunque realizan la misma función, no fueron seleccionados para el LAICS.

Radiación Fotosintéticamente Activa (LQS-70-10)

El dispositivo utilizado para medir PAR es comúnmente conocido como “medidor de quantum” y su elemento sensor es la celda de silicio de un fotodiodo que convierten la energía solar recibida en un voltaje de corriente directa. La unidad de medición que se utiliza en este tipo de dispositivos es el $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ y representa al quantum, o lo que es lo mismo, la cantidad de energía que transfiere un fotón. Los fotones de interés para un sensor PAR son aquellos que oscilan con una longitud de onda de entre 400 y 700nm.

Apogee Instruments Inc. es el fabricante del sensor LQS-70-10 (ver Figura 4); una barra de 70cm de longitud que tiene 10 sensores montados a lo largo de ella y cuya medición es el voltaje generado por los 10.

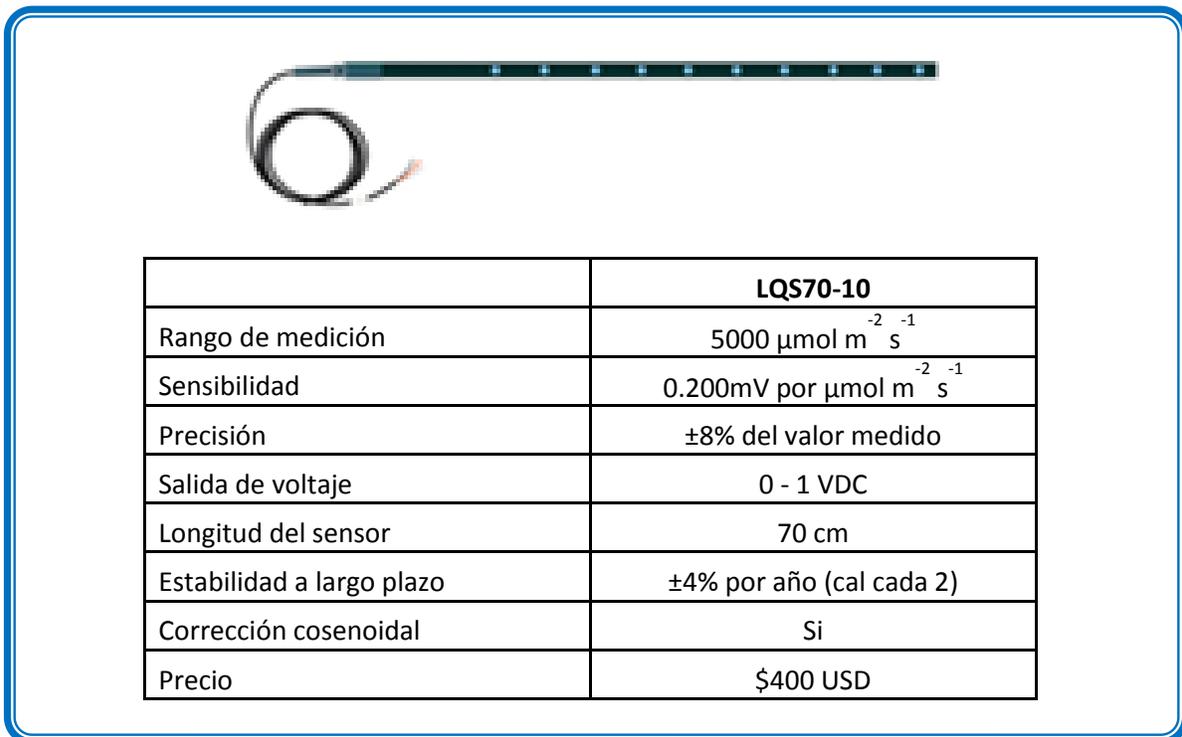


Figura 4 - Sensor PAR de Apogee Instruments. Modelo LQS70-10

El sensor tiene una respuesta de sensado de luz PAR que se apega a la respuesta real de la planta. Esto puede observarse al analizar las gráficas azul y verde de la Figura 5.

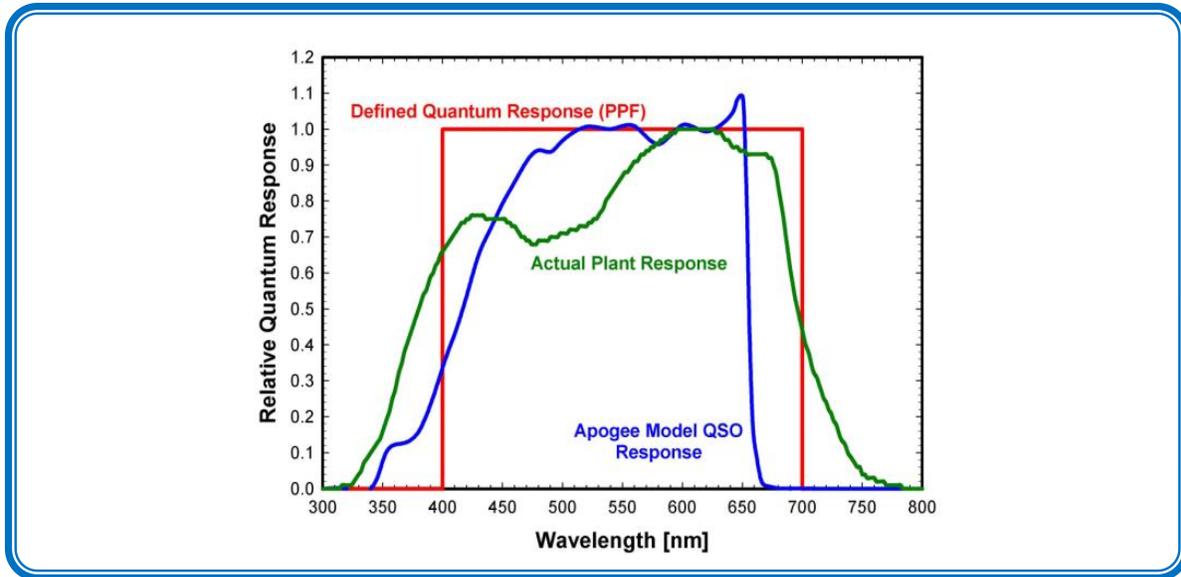


Figura 5 - Respuesta a la Longitud de Onda del Sensor LQS-70-10

Existen sensores que tienen una respuesta mucho más apegada a la línea rectangular (PPF) de la Figura 5, como es el caso del LI-191 de Li-Cor Biosciences, pero pruebas de campo han demostrado que ambos sensores tienen un desempeño de campo casi similar (ver Figura 6), por lo que la inversión adicional de \$10,000MN que debe hacerse por el LI-191 no es justificable.

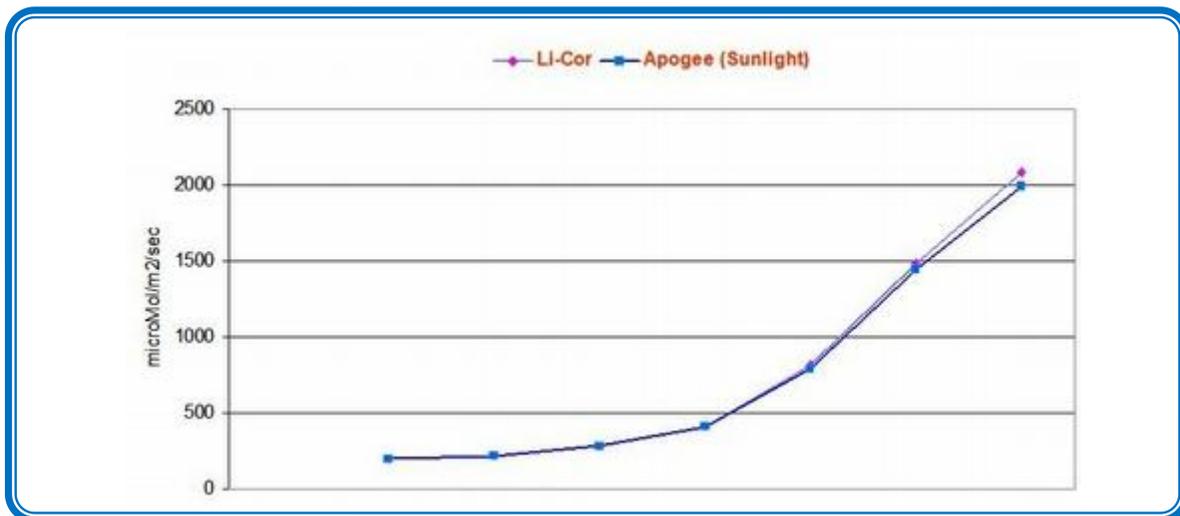


Figura 6 - Respuesta de los Sensores Li-Cor y Apogee para Iluminación bajo una Lámpara Iwasaki 6500K

Temperatura y Humedad Relativa del Aire (TRH-100-50FT)

Un mismo dispositivo se utiliza para medir tanto la temperatura como el porcentaje de humedad relativa del aire. El TRH-100-50FT (ver Figura 7) utiliza un termistor –que convierte la temperatura en un cambio en resistencia- como sensor de temperatura y una película de polímero semiconductor que varía su capacitancia como sensor para la humedad relativa. La unidad de medida para la temperatura son los grados centígrados (°C) y para la humedad relativa es el porcentaje (%HR). Pace Scientific es la empresa que fabrica dicho dispositivo.



	TRH-100-50FT
Rango de medición (humedad)	0 - 100% HR
Precisión (humedad)	±3% HR
Resolución (humedad)	1%HR
Resolución (temp.)	0.01°C
Rango de medición (temp.)	-25°C a 85°C
Precisión (temp.)	±0.3°C
Salida de voltaje	0 - 5VDC
Precio	\$350USD

Figura 7 - Sensor de Temperatura y Humedad Relativa del Aire de Pace Scientific Modelo THR-100-50FT

Vaisala fabrica el dispositivo sensor HMP45A que al igual que el THR-100-50FT mide temperatura y humedad relativa. La precisión en la medición de humedad relativa es la misma en ambos dispositivos mientras que la precisión de la medición de temperatura es mejor (de ±0.05°C) para el producto de Vaisala, pero la diferencia de \$3,000MN en el precio, aunada a que no se necesitan precisiones de mayor a medio grado centígrado, hacen del THR-100-50FT una excelente elección.

Concentración de Dióxido de Carbono (CO₂) del Aire (GMT 222)

La concentración de dióxido de carbono atmosférico se mide en partes por millón (ppm), que representan el número de moléculas de dióxido de carbono presentes en un millón de moléculas de aire. Debido a la dificultad para la medición de concentraciones de gases, para medir el CO₂ no se utilizó un sensor simple, sino un medidor completo. El medidor GMT 222 (ver Figura 8) de Vaisala es un dispositivo especialmente diseñado para aplicaciones del tipo agrícola, pues es recomendado para uso en invernaderos y cuartos de refrigeración de fruta. El GMT 222 utiliza un sensor que basa su medición en el principio de absorción de luz infrarroja por la molécula de CO₂; en el sensor, una cantidad de luz IR es emitida al aire a medir, la cantidad que sea absorbida es equivalente a la cantidad de CO₂ presente en la mezcla de gases.



	GMT 222
Rango de medición	0 - 10000 ppm Calibrado (0-1000ppm)
Precisión @ 25°C y 102kPa	±(15ppm +2% de la lectura) ±35ppm (caso extremo)
Estabilidad a largo plazo	<±50ppm cada 2 años
Tiempo de respuesta (63%)	30 segundos
Tiempo de arranque	15 min
Temperatura de operación	-20°C a 60°C
Humedad relativa para operar	0 - 100% no condensada
Salida de voltaje	0 - 10VDC
Resolución de la salida	0.6ppm
Precio	\$2250 USD

Figura 8 - Medidor de CO₂ de Vaisala. Modelo GMT 222

Para medir la concentración de dióxido de carbono el medidor LI-820 de la empresa Li-Cor Biosciences fue examinado pero por una mejoría en precisión de 5ppm no se justificó el incremento en precio de \$12,000MN.

Nivel de pH del Suelo (IQ240)

Un transistor de efecto de campo sensible a iones (ISFET – Ion Selective Field Effect Transistor) es el sensor que utiliza el medidor IQ240, de la empresa IQ Scientific, para llevar a cabo sus mediciones de nivel de pH. El transistor convierte la permeabilidad de su membrana a los iones o cationes hidrógeno en un voltaje que puede ser leído directamente del sensor o acondicionado por el medidor y de ahí adquirido (además del evidente despliegue digital del valor de pH medido). Una ventaja importante de utilizar ISFET sobre electrodos de vidrio para medir niveles de pH en suelos, es que el ISFET es mucho más resistente al desgaste mecánico que el electrodo de vidrio. Las principales características del IQ 240 son presentadas en la Figura 9.



	IQ240
Rango de medición (pH)	0.00 a 14.00 pH
Precisión (pH)	±0.01 pH
Salida de Voltaje (mV)	-420 a 420mV
Resolución (mV)	0.1mV
Precisión (mV)	±0.1mV
Rango de medición (temp.)	0 a 100°C
Puntos de calibración	3
Compensación de temp.	Si
Comunicación serial	Si
Precio	\$840 USD

Figura 9 - Medidor pH de IQ Scientific. Modelo IQ240

Otro medidor que se comercializa para mediciones de pH directas en el suelo es el HI99121 de Hanna Instruments, pero su falta de puertos de comunicación con la computadora y el hecho de que su electrodo (aunque robusto) sigue siendo de vidrio, anularon su selección pese a ser \$3,000MN más barato.

Humedad, Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura del Suelo (HydraProbeII)

Diversas técnicas de medición indirecta para evaluar la cantidad de humedad y conductividad eléctrica del suelo son utilizadas en la actualidad. Una de las más aceptadas por su elevado nivel de precisión es aquella que se encarga de medir la permisividad dieléctrica compleja (constante dieléctrica) del suelo, ya que la parte real de la permisividad se relaciona con la capacitancia y esta a su vez con la humedad, mientras que la parte imaginaria se relaciona con la conductividad eléctrica del suelo. Esto permite realizar ambas mediciones al mismo tiempo. El sensor HydraProbe II (Figura 10) de Stevens Water Monitoring System se encarga de realizar mediciones de humedad que son expresadas en fracción de volumen de agua (wvf), esto es m^3 de agua en m^3 de suelo; mediciones de conductividad eléctrica que son expresadas en la unidad convencional Siemens ($1/\Omega$) y que representan el contenido de sales de un suelo; y, mediciones de temperatura llevadas a cabo por un termistor en el interior del sensor y son expresadas en $^{\circ}C$.



	Hydra Probe II
Rango de medición (humedad)	0 - 100%
Precisión (humedad)	$\pm 2\%$
Rango de medición (ce)	0 - 1500 μ Siemens
Precisión (ce)	$\pm 15 \mu$ Siemens
Rango medición (temperatura)	-10 a $55^{\circ}C$
Precisión (temperatura)	$\pm 0.1^{\circ}C$
Comunicación serial	Si
Precio	\$870 USD

Figura 10 - Medidor Humedad, Temperatura y CE del Suelo de Stevens. Modelo HydraProbe II

La Figura 11 presenta la comparación de las mediciones realizadas por un método convencional de medición de humedad del suelo (gravimétrico) contra las mediciones realizadas por el HydraProbe II, y demuestra que el sensor es adecuado para realizar dichas mediciones.

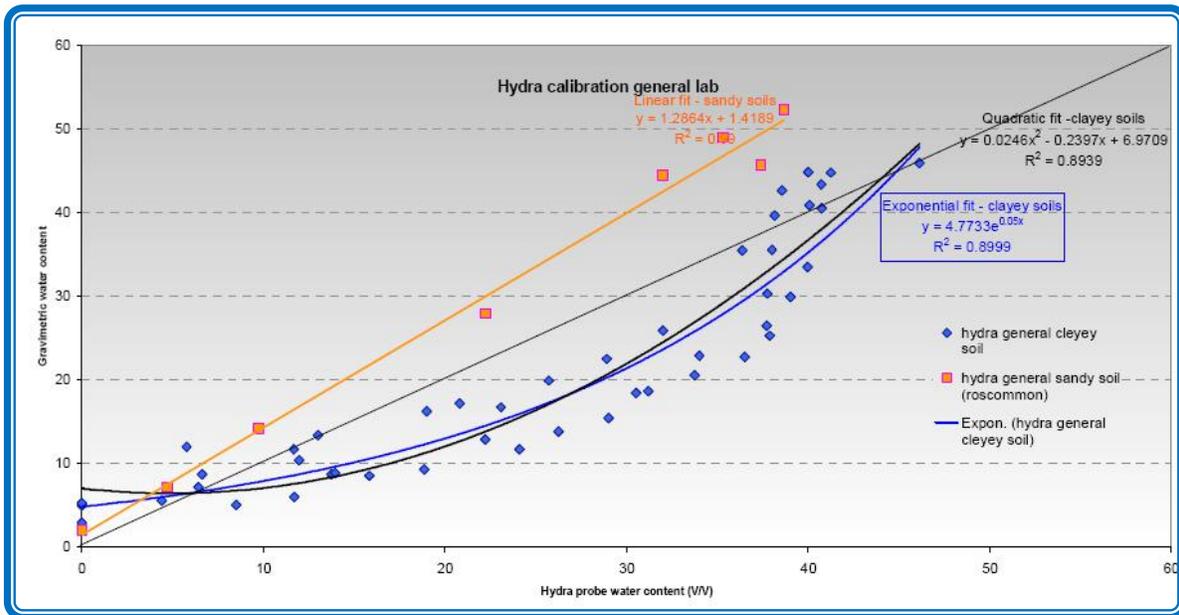


Figura 11 - Calibración del HydraProbe II para Suelos Arenosos y Arcillosos

El sensor WET-2 de la empresa Delta-T Devices funciona de forma muy similar a la HydraProbe II, con precisiones muy similares inclusive, sin embargo la mayor robustez de la HydraProbe II fue factor decisivo en su selección.

Muestreador Automático de Suelo

El proceso de medición directa de los niveles nutricionales del suelo no ha sido, hasta la fecha, perfeccionado completamente. Existen varios trabajos realizador en el desarrollo de nuevos sensores que permitan medir los nutrientes del suelo, sin embargo, sus autores resaltan la inestabilidad de sus resultados y falta de robustez en los dispositivos antes de poder ser empleados como instrumentos comerciales de medición (Adamchuka, Lundb, Sethuramasamyraja, Morgan, Dobermann, & Marx, 2005). Por esta razón, la medición de nutrientes del suelo en lugar de realizarse en el campo, se seguirá realizando en un laboratorio como es costumbre actualmente; la diferencia es el proceso de recolección de muestras de suelo.

Un mecanismo automatizado de recolección, envasado y etiquetado de muestras fue diseñado y construido con el propósito de facilitar la tarea de muestreo de suelo. Con la ayuda del dispositivo mostrado en la Figura 12, una impresora de etiquetas y un programa de control, el muestreo de suelo puede llevarse a cabo en cada árbol de forma sencilla y ordenada para que al final de un día de trabajo, el conjunto de muestras de suelo envasadas y etiquetadas puedan ser enviadas al laboratorio para su análisis.

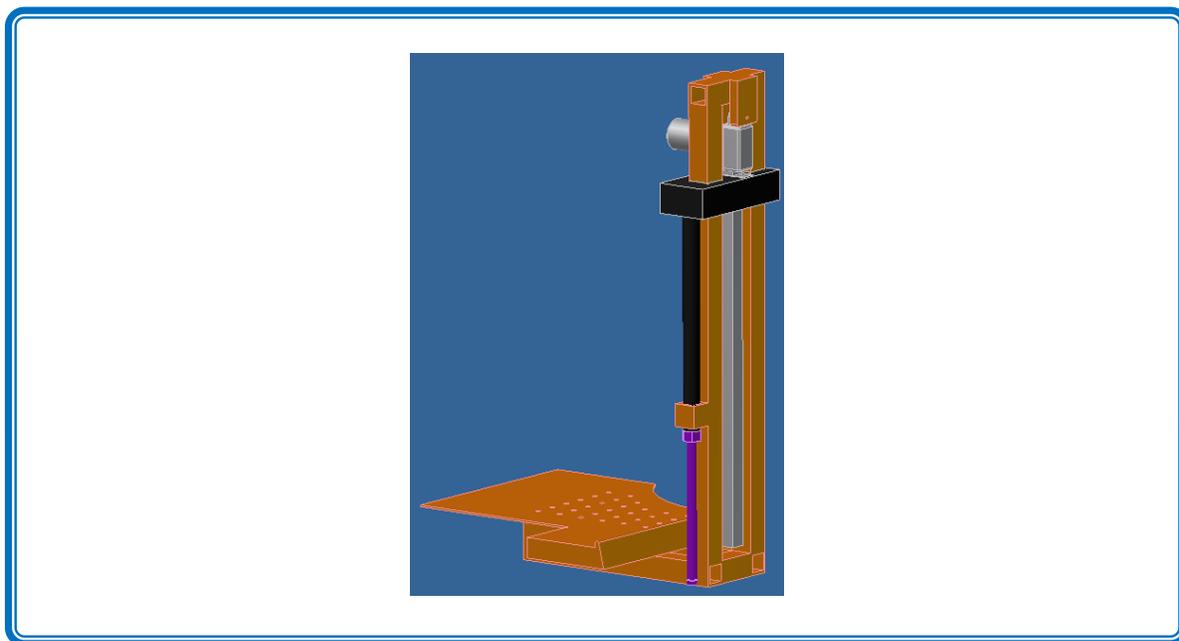


Figura 12 - Muestreador Automático de Suelo

Existen comercialmente dispositivos muestreadores automáticos de suelo como el Wintex 1000 de Precision Technologies que a pesar de su excelente desempeño tienen un costo muy elevado (cerca de \$100,000MN) y no llevan a cabo un etiquetado automático de las muestras obtenidas; por esta razón se decidió construir un dispositivo de fabricación propia.

Detalles del diseño y construcción de este dispositivo se muestran en el [Apéndice A](#).

Concentración de Clorofila en Hojas (CCM-200)

Opti Sciences comercializa el medidor CCM-200 (Figura 13) que utiliza el principio de absorbencia de luz por parte de la hoja para medir el nivel de clorofila que esta tiene. El realizar una relación de la cantidad de luz que es absorbida por una hoja a 653 y 931nm, el CCM-200 indica un índice de contenido de clorofila (CCI – Chlorophyll Content Index) que puede ir de 1CCI, indicando una presencia nula de clorofila, a 100CCI. El índice de contenido de clorofila es una

unidad propia de la empresa OptiSciences que tiene relación directa (Biber, 2007) con las unidades normalmente utilizadas en los laboratorios de análisis químicos (g/cm^2) y con las unidades utilizadas por otros dispositivos de medición que trabajan bajo el mismo principio (Figura 14).

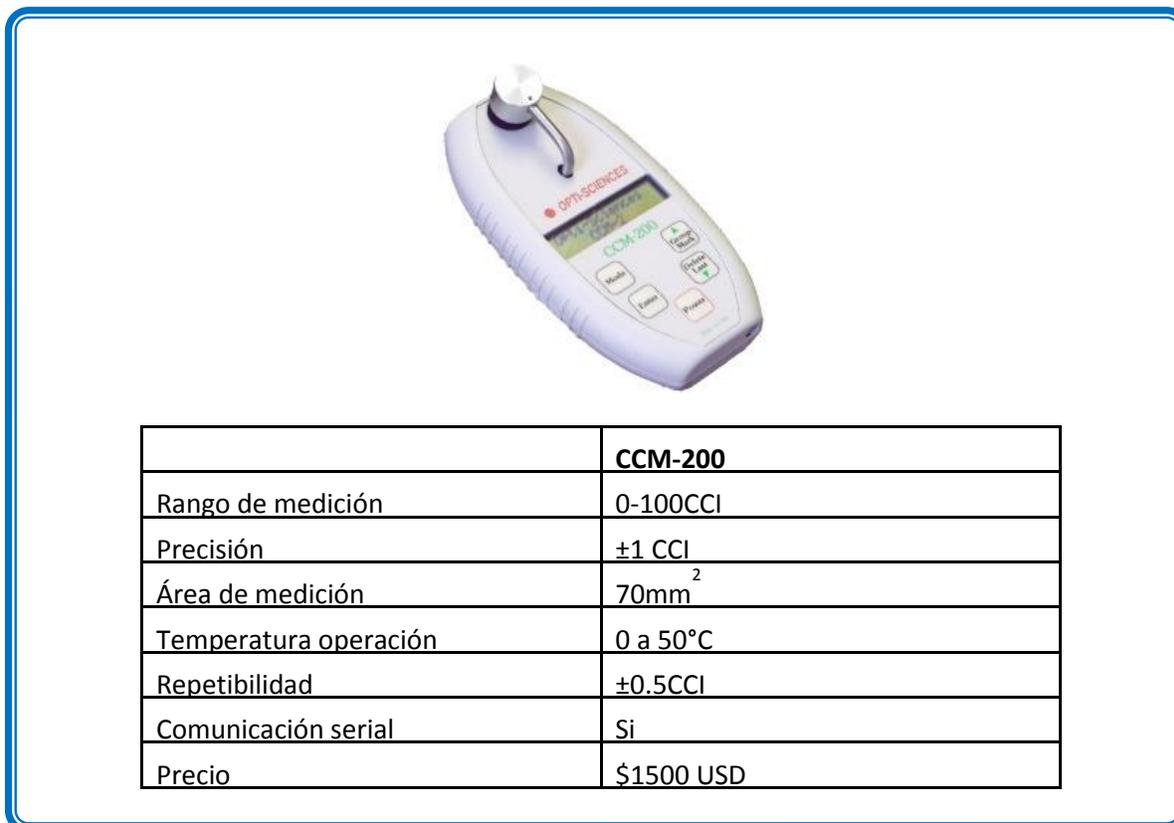


Figura 13 - Medidor de Clorofila de OptiSciences. Modelo CCM-200

Konica Minolta es el fabricante del medidor SPAD-502 que representa el principal competidor del CCM-200 ya que funciona bajo el mismo principio de medición. En ambos dispositivos ni la precisión ni el precio son suficientes parámetros como para elegir uno de los dos, sin embargo el área de medición que abarca el CCM-200 es 10 veces mayor que el área medida por el Minolta, haciendo que la medición sea mucho más representativa en el CCM-200 y por eso haya sido seleccionado.

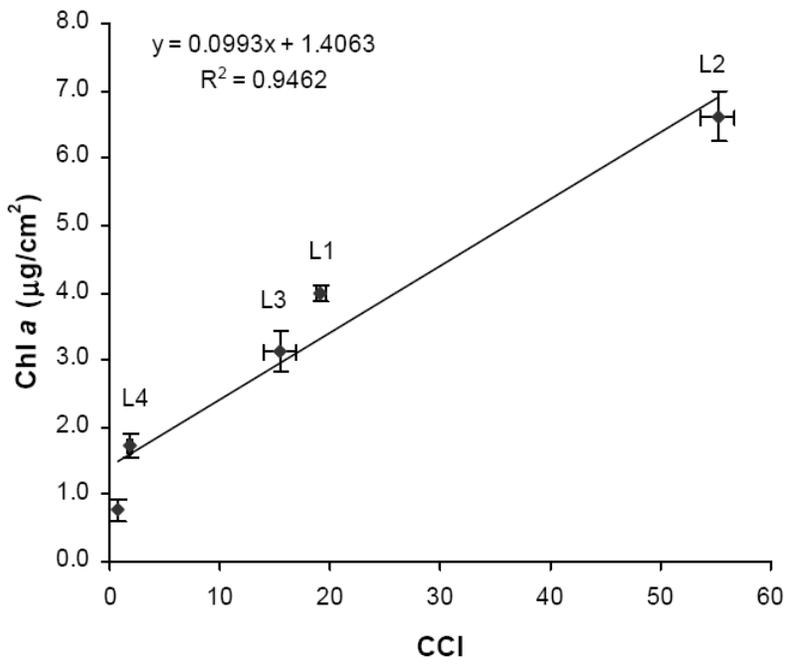
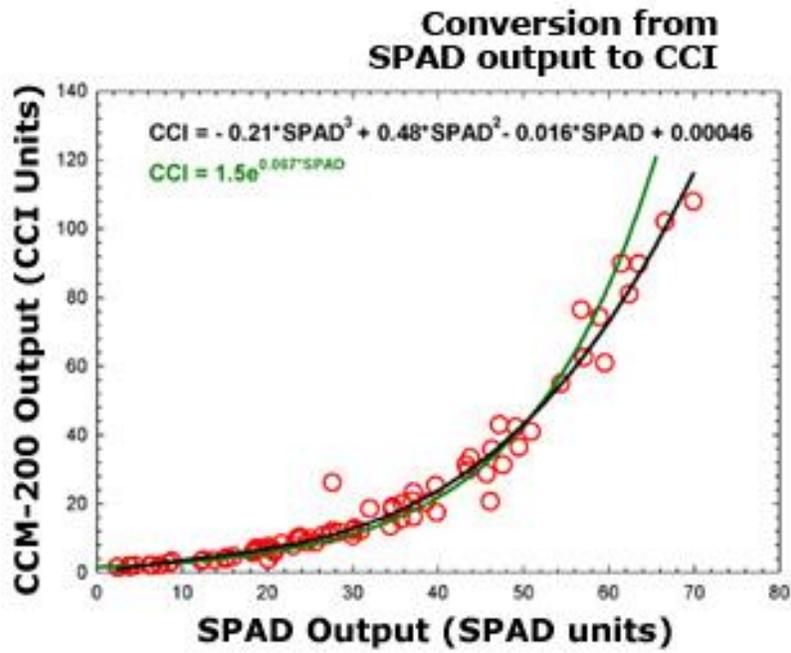


Figura 14 - Conversión de Unidades CCI-SPAD (arriba) y CCI- $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (abajo)

Nivel de Nutrientes en la Savia (C-122, C-131, C-141)

Para la medición del nivel de Na^+ , K^+ y NO_3^- en la savia se seleccionaron los medidores portátiles C-122, C-131 y C-141 (Figura 15) de marca Horiba. Este tipo de medidores utiliza un electrodo selector de iones que al ser comparado contra un electrodo de referencia, genera un voltaje proporcional a la concentración en ppm (partes por millón) de la solución estudiada. Los medidores interpretan ese voltaje y lo despliegan en una pantalla digital. Las ventajas de este tipo de medidores son principalmente su rapidez en la medición de la variable de interés y su alta correlación con las mediciones realizadas por métodos de laboratorio (Folegatti, Blanco, Marcelli, Boaretto, & Boaretto, 2005); sin embargo, en ocasiones la dificultad para extraer savia de las plantas es el reto a batir.

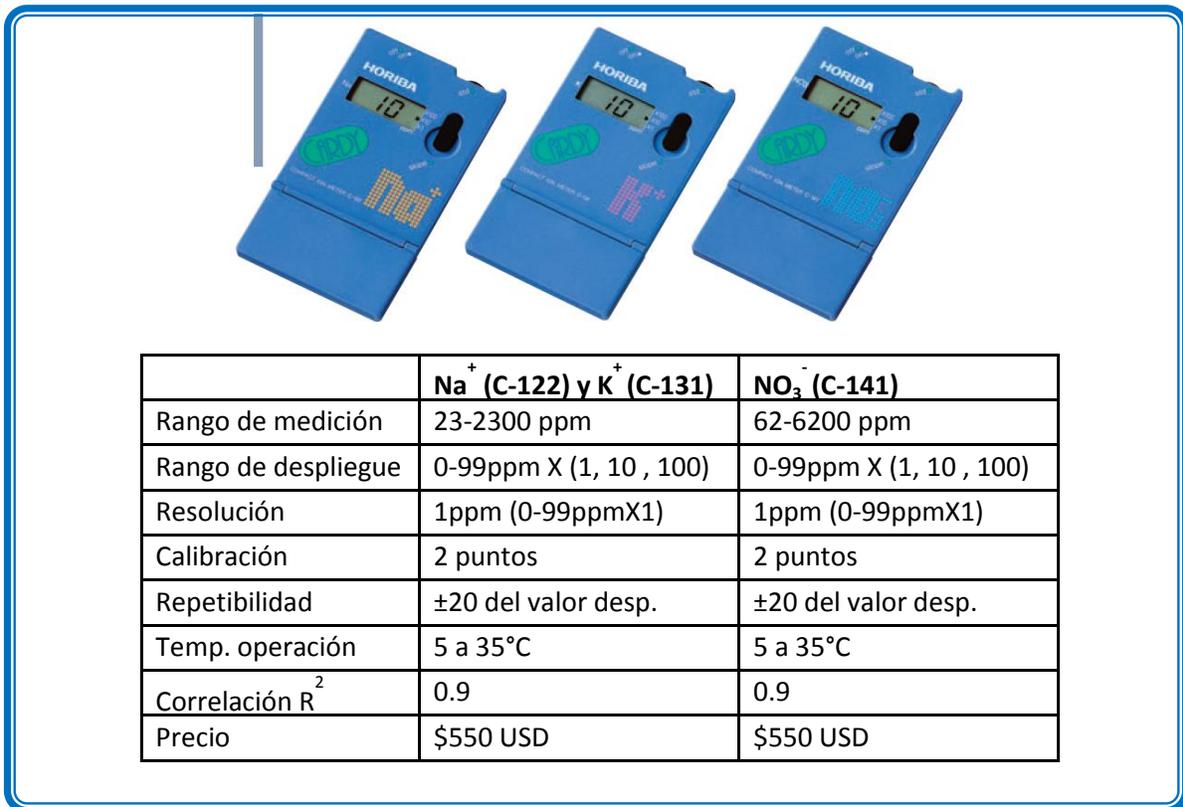


Figura 15 - Medidores de Nivel de en Savia de Horiba. Modelos C-122, C-131 y C-141

No se encontraron competidores directos a los medidores de nutrientes Horiba, al menos ninguno que utilice la misma metodología de medición rápida sin involucrar la creación de soluciones o preparaciones extensivas de muestras.

Posicionamiento Geográfico (GPS18@5Hz)

Los árboles de aguacate se encuentran separados de 8 a 15m en diferentes huertas del estado. Con el propósito de referenciar geográficamente el punto donde se localiza cada árbol medido se utilizó una antena Garmin GP18@5Hz (Figura 16). La antena elegida es capaz de actualizar su posición cinco veces por segundo, esto, en conjunto con el sistema de corrección diferencial de posición conocido como WAAS (Wide Area Augmentation System) proporciona una precisión de posición menor a los 2.5m en el 95% de los casos; precisión suficiente para identificar árboles que se encuentran a más del triple de distancia y que nunca cambian de lugar.

El principal competidor de la antena Garmin es la Trimble AgGPS106 que tiene como única ventaja probada el ser más robusta a condiciones de intemperie extrema (hielo, lluvias, polvo constante), ventaja que no justifica el costo del doble del valor de la GPS18@5Hz.



	GPS18@5Hz
Tiempo de arranque	50s
Tasa de adquisición de posición	5Hz
Precisión no diferencial	<15m
Precisión diferencias (WAAS)	<2.5m
Tipo de uso	Semi-rudo
Comunicación serial	Si
Precio	\$450 USD

Figura 16 - Antena GPS de Garmin. Modelo GPS18@5Hz

Computadora, Dispositivos de Interface, Fuente de Poder, Software de Programación y Vehículo Todoterreno

La selección del grupo de sensores es una tarea que si bien representa un reto de investigación sobre el estado del arte de las tecnologías de medición aplicables a cada variable, no

es un desarrollo científico en sí, ya que no se están diseñando ni mejorando los sensores existentes (a excepción del muestreador automático de suelo). Lo que si representa una aportación interesante a la comunidad agrícola es la integración de todas las mediciones que arrojan esos sensores; esto dentro de un mismo sistema móvil de adquisición, almacenamiento y análisis de datos, que por su velocidad y facilidad de uso, permita realizar el muestreo de las variables limitantes del crecimiento en cada árbol de una huerta de aguacate.

Para lograr la integración de los sensores y medidores seleccionados existen 4 componentes principales: una computadora portátil, un conjunto de tarjetas de adquisición de datos, una fuente de poder y un software de programación para aplicaciones avanzadas.

Computadora Portátil (Toughbook CF-52)

La función de la computadora en el LAICS es ser el cerebro del sistema. La computadora se encargará de recibir la información detectada por los sensores, analizarla, almacenarla y desplegarla al agricultor para que sea utilizada en las acciones de cultivo de la huerta. Es por eso que especial cuidado se dio a la selección de dicho equipo, pues si este no es adecuado, el LAICS en conjunto no operará.

Una computadora Toughbook CF-52 (Figura 17) de Panasonic fue seleccionada por tres motivos: 1.- Tiene una capacidad de procesamiento (Procesador Intel Centrino Duo 2 @ 1.8GHz con 2GB de RAM y 80GB de Disco Duro) suficiente como para soportar cualquier tipo de aplicación programada en cualquier lenguaje de alto nivel; esto es muy importante ya que tanto la programación como la ejecución de la aplicación de adquisición, almacenamiento y análisis de datos debe llevarse a cabo de forma rápida y sin problemas de procesamiento. 2.- Es una computadora portátil que permite realizar el trabajo de adquisición de datos directamente en el campo. 3.- Es una computadora de tipo robusto, esto es, es resistente a polvo, humedad, derrames de líquidos, golpes y vibraciones moderadas, todas las cuales son condiciones a las que la computadora está expuesta en una huerta de aguacate.

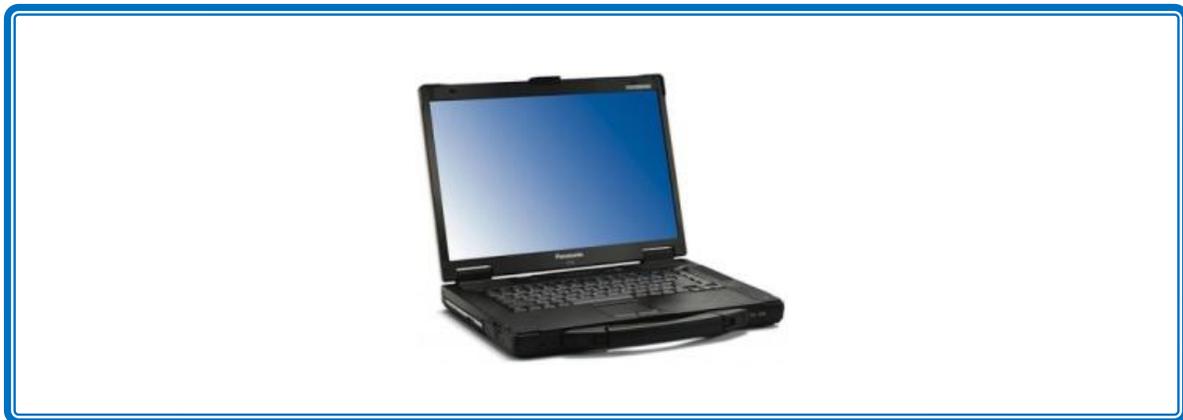


Figura 17 - Computadora Portátil Robusta de Panasonic. Modelo Toughbook CF-52

Tarjetas de Adquisición de Datos (NI-USB6008)

De los dispositivos seleccionados, existen cuatro (LQS70-10, TRH-100-50FT, GMT 222 e IQ240) que realizan cinco mediciones en conjunto y que entregan la variable medida en forma de voltaje análogo. Otros tres dispositivos (CCM-200, HydraProbe II y GPS18@5Hz) realizan cinco mediciones cuyo valor se entrega en forma de palabras digitales utilizando la comunicación serial RS-232. Adicionalmente el muestreador automático de suelo es controlado utilizando lógica secuencial booleana a través de cuatro entradas y dos salidas digitales.

Dos tarjetas de adquisición de datos NI-USB6008 (Figura 18 derecha) de National Instruments proveen 8 entradas de voltaje análogo (con convertidor ADC a 12 bits) y 24 entradas/salidas digitales, suficiente capacidad y precisión (referir al [Apéndice B](#)) para leerlos cuatro dispositivos requeridos y controlar el muestreador de suelo.

Para conectar los tres dispositivos que utilizan puerto serial RS-232 se utiliza un adaptador USB a 8 canales RS-232 (Figura 18 izquierda) de StarTech, pues la computadora solo cuenta con 1 puerto RS-232.



Figura 18 - Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB6008 y Adaptador USB a 8 RS-232

Fuente de Poder (AIMS 600)

Cada uno de los sensores y medidores que utiliza el LAICS, la antena GPS, el muestreador automático de suelos y la computadora portátil necesitan diferentes voltajes de corriente directa para poder funcionar. Bajo condiciones estáticas de operación (en un laboratorio por ejemplo), cada dispositivo sería capaz de obtener su voltaje del convertidor de corriente alterna a corriente directa con que vienen de fábrica y que se conectaría al tomacorriente de la instalación eléctrica de 120VAC, pero en una operación móvil, como es el caso del LAICS, no es posible conectar los convertidores de voltaje a una instalación eléctrica fija.

Dado que la única fuente de energía móvil disponible en el campo es la batería de 12VDC del vehículo todoterreno del LAICS y esta tiene que ser convertida a diferentes voltajes, se utilizó un inversor de voltaje AIMS 600 (Figura 19) de la empresa EnergyIgloo; de esta forma se permite que cada dispositivo siga utilizando su convertidor de voltaje de la misma forma que lo haría en una instalación eléctrica fija.

El inversor de onda completa (12VDC a 120VAC) tiene una capacidad de carga continua de 600Watts, que es suficiente para alimentar los 300Watts de carga máxima que consumen todos los dispositivos del LAICS en conjunto, además de que por ser un inversor de onda completa evita calentamiento de los convertidores y entrega una potencia más uniforme.



Figura 19- Inversor de Voltaje AIMS600

Una explicación más detallada del sistema de alimentación de voltaje de todos los dispositivos presentes en el LAICS se presenta en el [Apéndice C](#).

Software de Programación (LabView y Matlab)

Para adquirir y almacenar los datos provenientes de los sensores, e incluso para controlar el muestreador de suelos, el LAICS utiliza como plataforma de programación el software LabView 8.5 de National Instruments. LabView tiene la ventaja de ser un lenguaje gráfico de programación orientado en gran medida a la medición y control de sistemas, además de facilitar las tareas de adquisición de datos al utilizar las tarjetas NI-USB6008 o comunicaciones por el puerto serial.

Dentro de LabView se desarrollaron un conjunto de interfaces humano-maquina dedicadas a facilitar las operaciones de adquisición y almacenamiento semiautomático de datos medidos.

Para el análisis de datos (mapas de GIS de diagnóstico) la plataforma de programación fue MatLab R2007a de MathWorks. Matlab cuenta con una caja de herramientas de mapeo que facilitan la representación gráfica de información espacial. Además, LabView puede mandar llamar códigos de programación hechos en Matlab, por lo que las interfaces humano máquina desarrolladas en LabView no necesitan ser modificadas.

En la sección “Aplicaciones Programadas” (Cap4 pág.44) se detallan con claridad todos los elementos programados y sus funcionalidades.

Vehículo Todoterreno (Gator TH6X4)

La selección del vehículo todoterreno estuvo sujeta a tres criterios: 1.- El vehículo debe tener la capacidad de potencia y tracción suficientes para desplazarse sin problemas a través de huertas con pendientes inclinadas y en condiciones de humedad de suelo elevada. 2.- Debe transportar seguramente a dos pasajeros que trabajarán en la recolección de datos en el campo. 3.- Debe tener un compartimiento de carga con capacidad de al menos 300Kg para poder llevar a cada árbol todos los instrumentos de medición, accesorios necesarios para medir y el muestreador automático de suelo.

El Gator TH6X4 (Figura 20) de John Deere es un vehículo todoterreno de dos pasajeros que cuenta con un motor Kawasaki de 20Hp, tracción en cuatro de sus seis ruedas y una caja con capacidad de carga de hasta 500Kg; características que lo hacen ideal para el LAICS.



Figura 20 - Vehículo Todoterreno de John Deere. Modelo Gator TH6X4

CAP4 – Integración de Componentes del LAICS

CAP 4 – Integración de Componentes del LAICS

El sistema LAICS es propiamente la integración del conjunto de sensores, medidores, tarjetas de adquisición de datos, computadora, antena GPS y vehículo todoterreno descritos en el capítulo anterior; integración que tiene como objetivo que el agricultor de aguacate pueda realizar mediciones de las variables que inciden sobre la producción de sus árboles, y obtener como producto de la medición un mapa de diagnóstico de su huerta en forma de mapa GIS. La Figura 21 muestra el diagrama esquemático de cómo los componentes que conforman al sistema LAICS deben interactuar entre ellos para ir de las mediciones semiautomatizadas, a los mapas de diagnóstico de la huerta.



Figura 21 - Diagrama Esquemático de los Componentes del LAICS

La integración de los componentes del LAICS se compone de dos etapas: la primera tiene que ver con todos aquellos aspectos que ocurren fuera de la computadora, como son el acomodo y la agrupación de sensores, adaptación de los instrumentos en el vehículo, etc., lo que se conoce como hardware del sistema; la segunda tiene que ver con todos los procesos que suceden dentro de la computadora, esto es, lo relacionado con software.

Agrupación de Hardware

Varios aspectos fueron considerados antes de agrupar todos los elementos físicos del LAICS, los más importantes, y que a su vez dictaron la configuración final, son: 1.- Los sensores que puedan hacer mediciones simultáneas con otro sensor, deben ser agrupados para que en sean

acercados al árbol a tomar la medición en un mismo momento; preferentemente variables del aire con variables del aire, variables de suelo con variables de suelo, etc. 2.- Los sensores deben poder ser acercados al árbol y desplazados alrededor del mismo para poder medir los cuatro cuadrantes del árbol (referir a la sección “División del Árbol en Cuadrantes”, (Cap5 pág.61). 3.- Las tarjetas de adquisición de datos, fuentes de poder y circuitería en general que está involucrada con el funcionamiento de los sensores y medidores debe estar protegida de la intemperie (polvos, basura, hojas, derrames, vibraciones y golpes). 4.- La computadora, aunque de uso rudo, va a ser transportada encendida por terrenos accidentados, por lo que debe tener un sistema de suspensión extra. 5.- La alimentación de poder de todos los equipos puede provenir únicamente de la batería del vehículo todoterreno. 6.- Todos los dispositivos físicos (sensores, fuentes de poder, computadora, etc.) deben poder ser retirados del vehículo y almacenados de forma rápida para permitir su transportación al final de un día de trabajo, exceptuando el muestreador de suelos que debe permanecer sujeto al vehículo.

Para cumplir con los requisitos especificados se construyó una caja de madera en donde se almacenan las fuentes de poder de todos los sensores, tarjetas de adquisición de datos y circuitos de control del muestreador de suelo; dentro de la caja todos los componentes electrónicos más delicados son protegidos de polvos y basuras a los que se está expuesto al trabajar en el campo. De la caja salen únicamente los cables de 10m que comunican a los sensores con las tarjetas de adquisición de datos, los cables que comunican a las tarjetas con la computadora y el cable de alimentación general que es conectado a un inversor de voltaje alimentado de la batería del vehículo; sobre la caja se fijaron una suspensión para la computadora, la impresora de etiquetas utilizada para identificar las muestras de suelo, el medidor de pH y una botonera que permite disparar las mediciones de todos los sensores sin necesidad de utilizar los botones de la computadora (evitando su desgaste prematuro).

Los tres sensores de variables atmosféricas (LQS70-10, TRH-100-50FT, GMT 222) fueron montados en la parte superior de una pértiga de 2.5m, a la mitad de ésta se montó una segunda botonera que dispara las mediciones remotamente y en la parte inferior se fijó el sensor HydraProbe II; los cables de 10m de los sensores fueron agrupados dentro de un tubo flexible para evitar que sean dañados o trozados en el proceso de medición alrededor del árbol. La configuración de los sensores permite realizar mediciones en los cuatro cuadrantes del árbol sin la necesidad de llevar el vehículo o la computadora a cada cuadrante.

Tanto la caja de madera, como los sensores y sus cables son contenidos dentro de una maleta de uso rudo a prueba de golpes y agua; esta maleta confiere al LAICS la capacidad de almacenar rápida y prácticamente todos sus componentes de instrumentación y mediciones dentro de un contenedor capaz de proteger equipos delicados durante su transporte.

En la Figura 22 se muestra el proceso de integración llevado a cabo para la parte de hardware del LAICS.

Para ver el detalle de errores y soluciones de la integración del hardware referir al [Apéndice D](#).



Figura 22 - Proceso de Integración de Hardware del LAICS

En la Figura 22.2 se pueden apreciar todos los componentes electrónicos delicados que deben ser protegidos dentro de la caja de madera. La Figura 22.3 y Figura 22.4 muestran la caja de madera cerrada fuera y dentro de la maleta de transporte; sobre la caja de madera se observan la suspensión de la computadora, la botonera, la impresora, el medidor de pH y de clorofila. Es

importante mencionar que la caja de madera es aislada de vibraciones y golpes externos mediante láminas de espuma de poliuretano localizadas entre la caja y la maleta. En la Figura 22.5 la computadora portátil está montada y conectada a las tarjetas de adquisición de datos y en la Figura 22.6 se muestran los sensores, cuyos cables van en el interior del poliducto flexible, y la pértiga que se utiliza para acercar los sensores a los diferentes cuadrantes del árbol.

La integración de todos estos componentes representó apenas la mitad del desarrollo del LAICS, ya que aún falta poder leer las mediciones obtenidas de los sensores, asegurar la precisión y calibración de dichas mediciones, almacenar las mediciones en una base de datos y generar los mapas GIS.

Aplicaciones Programadas

Con la agrupación de hardware se ha logrado que todos los sensores envíen su información a la computadora a través de un par de puertos USB, que se transporten fácilmente y que estén protegidos del ambiente agrícola. Ahora es necesario utilizar dicha información dentro de la computadora, razón por la cual un total de ocho interfaces humano-máquina fueron programadas para el LAICS.

Al iniciar el funcionamiento de las aplicaciones programadas una pantalla principal (Figura 23.A) permite al usuario seleccionar entre una de las dos actividades que pueden realizarse: medir en un árbol las variables descritas en el capítulo 1 (referenciadas geográficamente para diferenciarlas de aquellas medidas en otros árboles), o, crear mapas GIS para diagnosticar el estado de cada una de las variables medidas en una huerta. Si se elige realizar mediciones (Figura 23.B) un conjunto de cinco sub-pantallas (de la Figura 23.B.1 a la Figura 23.B.5) presentan al usuario una forma sencilla de visualizar y almacenar los valores medidos en cada uno de los cuatro cuadrantes del árbol, permitiendo regresar en cualquier momento hasta la pantalla principal del sistema. Por otra parte, si se elige crear mapas GIS, una pantalla (Figura 23.C) permitirá al usuario recuperar la información de mediciones anteriores para generar mapas del estado de la huerta (Figura 23.C.1) y del diagnóstico de cada una de las variables medidas (Figura 23.C.2).

Es en sí, el conjunto de aplicaciones desarrolladas dentro de LabView, le confiere al LAICS la capacidad de realizar mediciones de forma semiautomatizada; pues basta con acercar el sensor al lugar donde se desea realizar la medición y oprimir un botón, para tener almacenado en la computadora el valor medido por el o los sensores utilizados.

Se debe mencionar que en la pantalla principal de mediciones (Figura 23.B) únicamente se muestran los valores de todas las variables medidas para el árbol en turno. Las mediciones de cada variable en los cuatro cuadrantes del árbol se realizan utilizando las pantallas secundarias; por ejemplo, la pantalla de la Figura 23.B.3 realiza la medición de pH del suelo para los cuatro cuadrantes, mientras que las mediciones de clorofila se realizan en la pantalla mostrada en la Figura 23.B.2. Para conocer el detalle de la programación realizada ver el [Apéndice E](#).

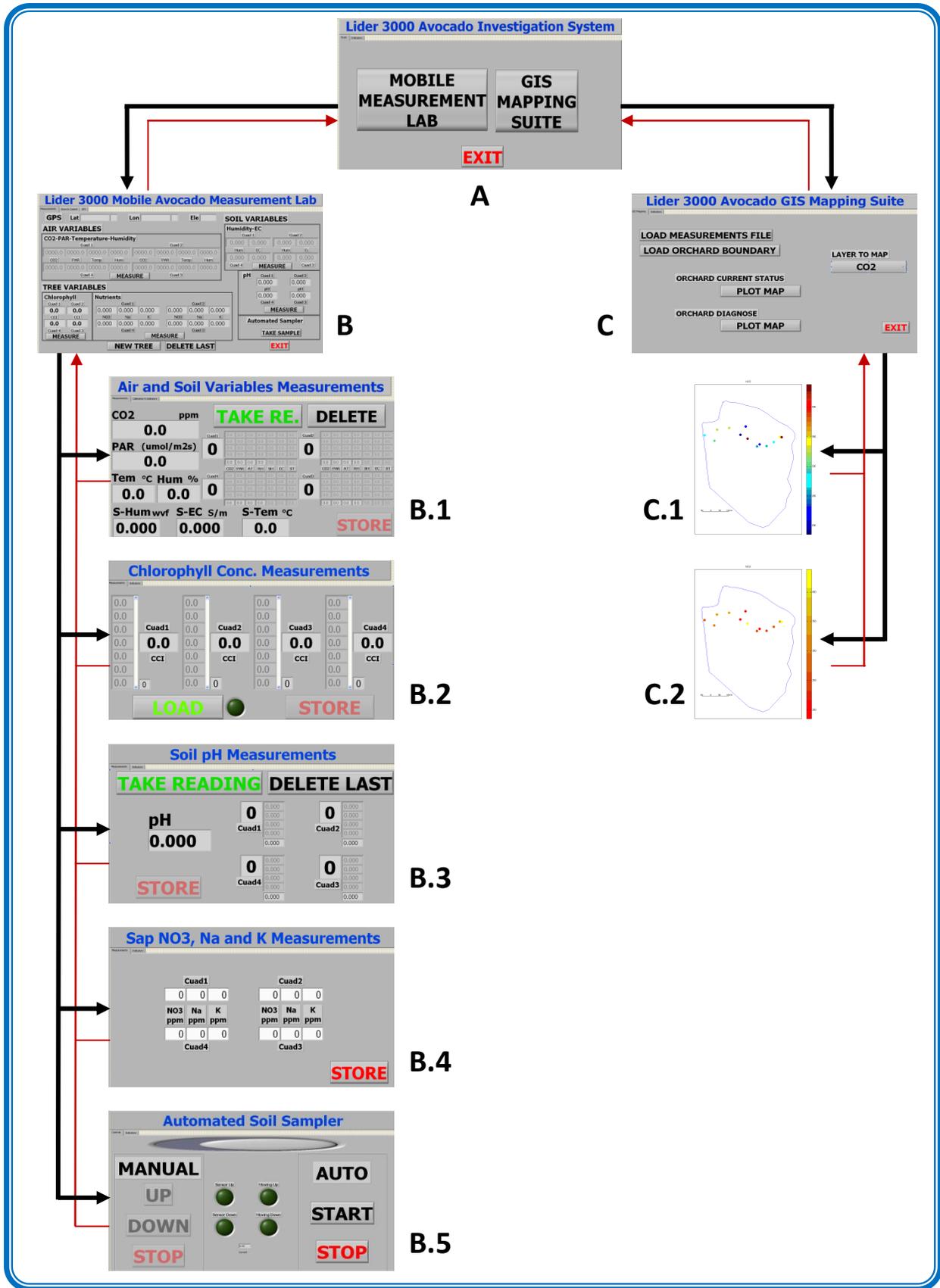


Figura 23 - Aplicaciones Programadas para el LAICS

Otro punto importante a mencionar es que aquellos sensores en los que es físicamente posible realizar mediciones simultáneas, fueron agrupados en una misma pantalla de medición (Figura 23.B.1) para facilitar su manejo y reducir el tiempo de adquisición de información. Es el caso concreto de todos los sensores que se encuentran montados en la pértiga de medición y que se encargan de medir PAR, concentración de CO₂, temperatura y humedad relativa del aire, conductividad eléctrica, temperatura y humedad del suelo.

Con las dos integraciones (hardware y software) realizadas, el LAICS es capaz de medir un gran número de variables y generar mapas GIS. Sin embargo, como la intención de los mapas GIS es proporcionar a los agricultores información detallada sobre los excesos o deficiencias de las variables medidas en su huerta, es necesario asegurar que los datos con los que están generados dichos mapas sean verdaderos, es decir, asegurar que los sensores y medidores en verdad miden y entregan valores correctos.

Calibración de Sensores y Medidores

Para asegurar la calidad de las mediciones realizadas por los sensores, se llevaron a cabo dos procedimientos: una curva de calibración para aquellos sensores y medidores en los que el fabricante así lo permite, y una validación de que las mediciones desplegadas en la pantalla de la computadora son efectivamente correctas una vez que se han calibrado los instrumentos. Con estas dos actividades se asegura no solo que los sensores midan correctamente, sino que la adquisición de la información medida hacia la computadora no tenga errores, pues el valor recibido por la computadora es el que será utilizado para diagnosticar la huerta.

En esta sección se profundizará sobre los procedimientos de calibración y validación realizados a cada sensor, de tal forma que quede demostrado que el sistema LAICS mide correctamente las variables de interés y por lo tanto puede utilizarse como un sistema de retroalimentación para el lazo de control del árbol de aguacate planteado en el capítulo 2.

Filtrado de Señales para Sensores y Medidores Análogos

Existen diez dispositivos de medición que necesitan comunicarse con la computadora. Cuatro de ellos (LQS70-10, TRH-100-50FT, GMT 222 e IQ240) se comunican utilizando voltajes análogos que deben ser leídos por las tarjetas de adquisición de datos, tres de ellos (GPS18@5Hz, HydraProbe II y CCM-200) se comunican utilizando voltajes digitales que deben ser leídos por la computadora utilizando comunicación serial RS-232 y, los otros tres (C-122, C-131 y C-141), no tienen modo de comunicarse con la computadora, por lo que sus valores deben ser introducidos a la computadora manualmente utilizando el teclado.

Para los cuatro dispositivos que se comunican utilizando voltajes análogos adquiridos por las tarjetas NI-USB6008, el ruido eléctrico es un factor de consideración importante, pues si se

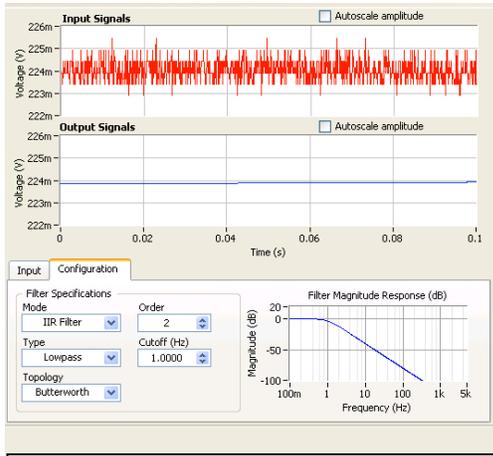
montan señales de ruido (125Hz) sobre la señal de voltaje que generan los sensores o medidores, la medición recibida en la computadora será incorrecta, y al multiplicarse por el factor de escala de cada sensor, se magnificará el error en términos de la magnitud de la variable medida. Por ejemplo: si el sensor de humedad relativa genera 1mV por %HR y su ruido eléctrico tiene una amplitud de $\pm 1.5\text{mV}$, entonces la humedad relativa desplegada va a oscilar en un rango de $\pm 1.5\%HR$; es decir, si la humedad relativa real fuera 68%, el sensor va a estar oscilando de forma muy rápida entre 66.5 y 69.5%HR. Quizá en magnitud y para efectos de control del árbol, el error derivado del ruido eléctrico no es críticamente importante, sin embargo, para el usuario es muy confuso estar observando una medición que oscila entre tantos valores y de forma tan rápida, sobre todo para fenómenos que es evidente que no pueden cambiar tan rápidamente, como es la humedad relativa.

Dentro de las aplicaciones de software programadas, un filtro digital pasabajos (preprogramado por LabView) de 2do orden, tipo butterworth con frecuencia de corte a 1Hz fue agregado directamente a la medición de los voltajes analógicos provenientes de cada uno de los cuatro sensores mencionados. La frecuencia de corte elegida es tan baja porque no existe la posibilidad de que ninguna de las 5 variables medidas cambie su valor real en menos de un segundo. Con lo anterior se logró reducir el error de medición derivado del ruido en las señales de medición en un 100% para todos los casos, excepto para el sensor de PAR, que fue reducido en un 96%. En la Tabla 1 se muestran los valores de los errores causados a cada variable medida por efecto del ruido eléctrico.

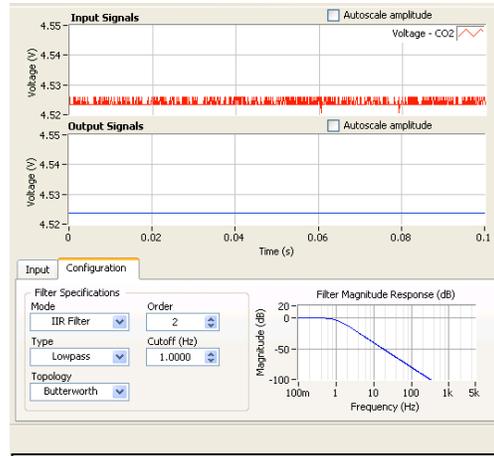
Tabla 1 - Evaluación de Errores Derivados del Ruido Eléctrico en Sensores Análogos Antes y Después de Filtrar

	PAR	CO ₂ Aire	Temp. Aire	pH Suelo	Hum. Rel. Aire
Rango del instrumento	0-2000 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0-1000ppm	-25 a 85°C	0 a 14pH	0 a 99%HR
Señal de salida	0-400mVDC	0-10VDC	4.7 a 1.2VDC	-450mV a 350mV	0 a 3.9VDC
Amplitud del ruido	$\pm 1.3\text{mVDC}$	$\pm 0.03\text{mVDC}$	$\pm 3\text{mVDC}$	$\pm 1.5\text{mVDC}$	$\pm 5\text{mVDC}$
Error por ruido	$\pm 6.5\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\pm 3\text{ppm}$	$\pm 0.1^\circ\text{C}$	$\pm 0.025\text{pH}$	$\pm 0.125\%HR$
% Error por ruido	$\pm 0.325\%$	$\pm 0.3\%$	$\pm 0.09\%$	$\pm 0.185\%$	$\pm 0.125\%$
Error con filtro	$\pm 0.25\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\pm 0\text{ppm}$	$\pm 0^\circ\text{C}$	$\pm 0\text{pH}$	$\pm 0^\circ\text{C}$
% Error con filtro	$\pm 0.0125\%$	$\pm 0\%$	$\pm 0\%$	$\pm 0\%$	$\pm 0\%$

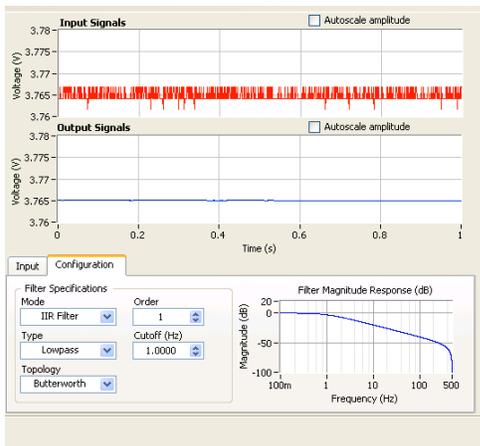
En la Figura 24 se muestra el efecto gráfico del filtrado de las cinco señales provenientes de los cuatro dispositivos en conflicto. Se puede observar la clara disminución del error de medición por efecto del filtrado digital de la señales adquiridas a través de la tarjeta NI-UISB6008.



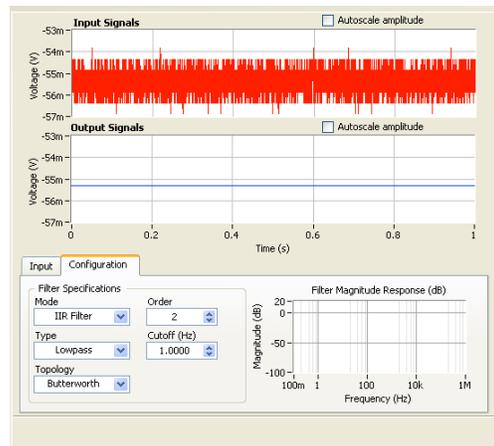
Filtro Digital Medición PAR



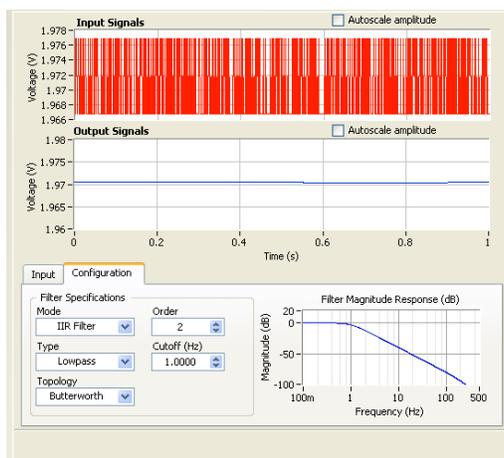
Filtro Digital Medición CO₂ Aire



Filtro Digital Medición Temp. Aire



Filtro Digital Medición pH Suelo



Filtro Digital Medición Hum. Rel. Aire

Figura 24 - Filtros Digitales Utilizados para Minimizar el Error por Ruido Eléctrico de los Sensores Análogos

Curvas de Calibración para Sensores y Medidores

Nueve de los sensores y medidores que conforman el LAICS pueden de alguna manera ser calibrados (LQS70-10, TRH-100-50FT, IQ240, HydraProbe II, GMT 222, CCM-200, C-122, C-131 y C-141). Los procesos de calibración realizados a cada uno son diferentes debido tanto a la naturaleza de las variables medidas, como a la complejidad de calibración permitida por el fabricante.

A continuación se describe la calibración realizada para los once sensores contenidos en los ocho dispositivos mencionados.

Sensor de PAR LQS70-10

Utilizando un medidor de radiación fotosintéticamente activa modelo LQM70-10 fabricado por Apogee Instruments, se realizó una curva de radiación medida por el LQM70-10 vs voltaje filtrado generado por el sensor LQS70-10. El medidor viene con la garantía de que su calibración presenta un 0% de error ante mediciones de luz solar y está evidentemente respaldado por la empresa, por lo que es un instrumento aceptable como referencia de calibración.

Para obtener la curva, las barras de sensado de ambos dispositivos se colocaron juntas bajo luz directa del sol con sus 10 sensores descubiertos. A continuación se registraron 20 valores de radiación medida por el medidor junto con el voltaje generado por el sensor y leído por la tarjeta NI-USB6008. Posteriormente se taparon uno a uno los sensores de ambas barras para disminuir la cantidad de luz recibida y en cada momento 20 valores de radiación medida y voltaje generado fueron almacenados. Finalmente con ayuda de Excel se realizó una regresión lineal de la curva de calibración que quedó como se muestra en la Figura 25.

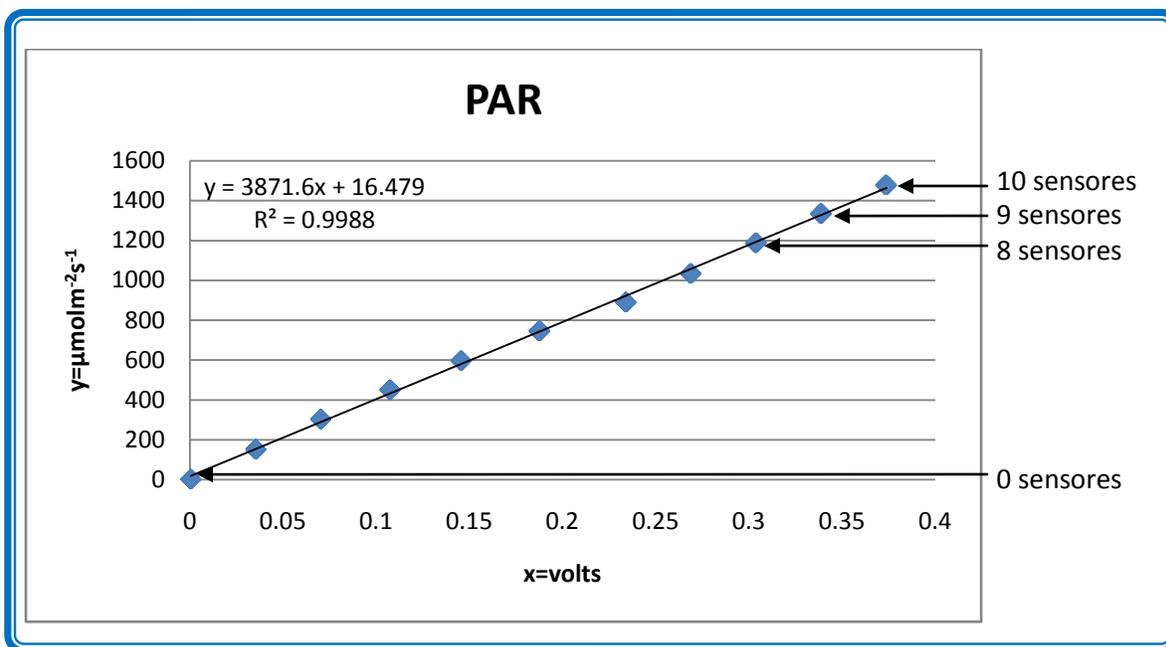


Figura 25 - Curva de Calibración para el Sensor LQS70-10

Analizando valor del cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson ($R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right]^2$), que establece una medida del grado de asociación lineal entre la variable respuesta y la variable predictor (concretamente entre la variable respuesta y la recta de regresión estimada), se puede asegurar que la regresión lineal es sumamente confiable pues su valor es muy cercano a 1 y la suma de errores al cuadrado es casi cero ($1 - R^2 = \frac{SSE}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$).

Utilizando la recta de la ecuación obtenida $y = 3871.6x + 16.479$ se escala el voltaje leído dentro de las aplicación de LabView correspondiente (Figura 23.B.1) para finalmente desplegar en pantalla el valor de radiación fotosintéticamente activa medida.

Sensor de Temperatura del Aire TRH-100-50FT

El elemento sensor de temperatura dentro del THF-100-50FT es un termistor YSI 45008 de 30KΩ. La medición de resistencia (proporcional a la temperatura) se realiza por medio de un divisor de voltaje que cambia de voltaje por efecto del cambio de resistencia del termistor.

La curva de calibración para este sensor se realizó utilizando un termopar tipo K conectado a un Supermedidor Omega HHM290. Para esto se colocaron ambos sensores dentro de una cápsula de aire sellada y sumergida dentro de un baño de agua donde la temperatura fue variada de 0 a 60°C cada °C. Una vez estable la temperatura, se almacenaron manualmente (en un lapso de 30s) cinco mediciones de temperatura desplegada por el HHM290 vs voltaje en el termistor leído en la computadora. Se realizó el mismo proceso para cada incremento de temperatura y se obtuvo finalmente la curva presentada en la Figura 26.

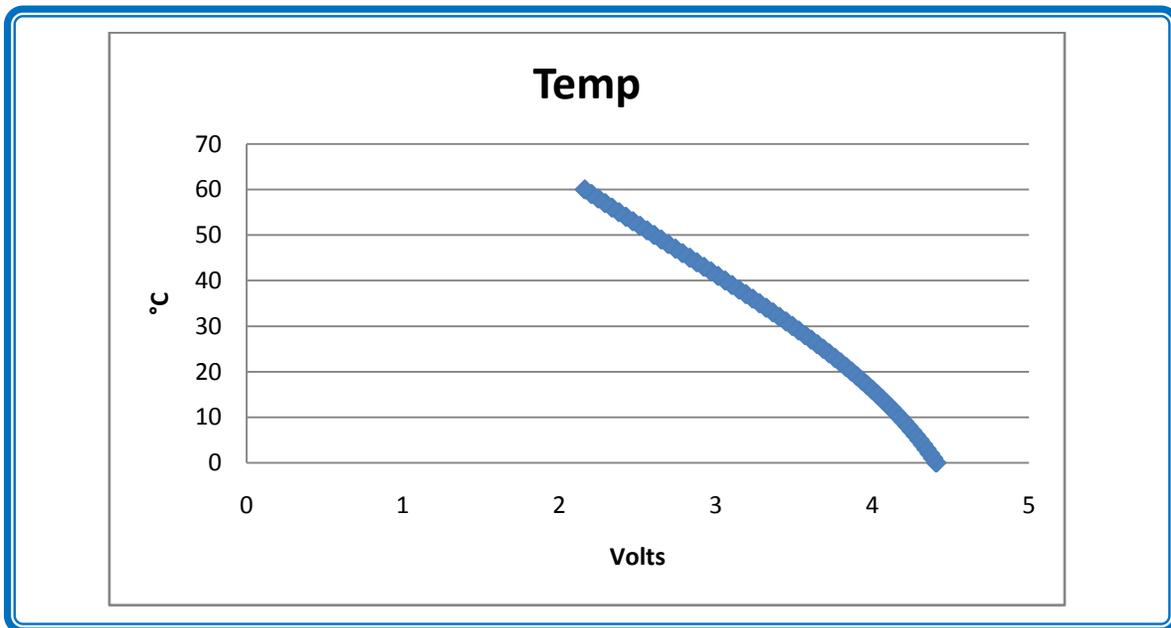


Figura 26 - Curva del Calibración para el Sensor de Temperatura del THF-100-50FT

Dada la naturaleza no lineal de los termistores, que puede ser apreciada en la curva de calibración, no se realizó una regresión lineal dentro de Excel. En este caso se programó una tabla de voltaje leído vs temperatura a desplegar para que dentro de la aplicación correspondiente (Figura 23.B.1) se lea el voltaje proveniente del sensor (divisor de voltaje) y se convierta en una temperatura desplegada. Los valores de temperatura que se encuentran en los puntos intermedios entre cada grado centígrado son calculados mediante una interpolación lineal.

Sensor de Humedad Relativa del Aire THR-100-50FT

Para realizar la medición de humedad relativa el THR-100-50FT utiliza el sensor HIH-4000-004 de Honeywell, quien especifica que en general este tipo de dispositivos responden adecuadamente a la recta de calibración $y = 30.68x - 31.22$, donde “y” es la humedad relativa del aire y “x” es el voltaje generado por el sensor.

Por su parte, Pace Scientific, quien es fabricante de dispositivo de medición de temperatura y humedad relativa THR-100FT-50FT, entrega la prueba con una recta de calibración realizada por ellos dentro de sus laboratorios y que es $y = 34x - 27.6$. Si se observa (Figura 27), ambas rectas son similares en sus valores de pendiente y de offset. Se consideró que la recta dada por Pace Scientific es más apegada a la realidad del sensor del LAICS, pues a pesar de que Honeywell fabrica los sensores, sus curvas son una aproximación que debe funcionar adecuadamente para millones de sensores y no necesariamente es la más exacta para cada uno de ellos.

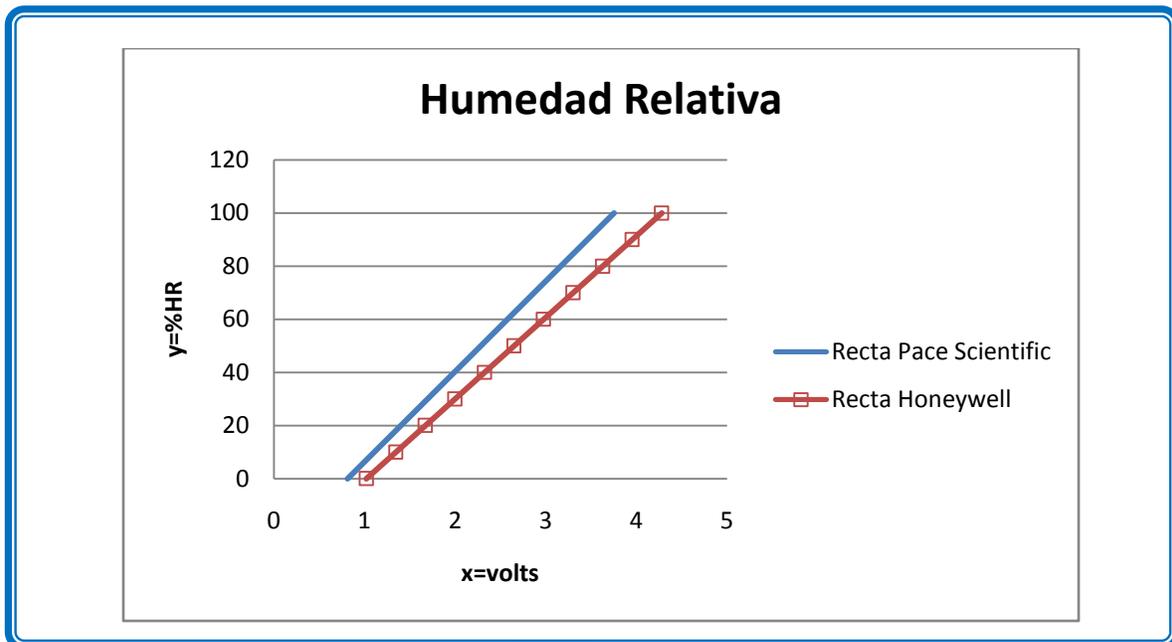


Figura 27 - Comparación de las Rectas de Calibración para el Sensor HIH-4000-004

Es necesario aclarar que en este caso no se cuenta con un método eficiente y preciso para variar la humedad relativa del aire, razón por la cual se confió en la calibración entregada por Pace Scientific.

Medidor de pH del Suelo IQ240

El medidor de IQ Scientific es un instrumento que, como cualquier medidor de pH, debe ser calibrado utilizando buffers de referencia, preferentemente cada que se enciende el medidor. En el caso del medidor de pH del LAICS se utilizaron tres buffers de calibración, uno de pH4, otro de pH 7 y otro de pH10. Los buffers son marca pH Control y su pH está garantizado en ± 0.02 de pH.

El proceso de calibración que se lleva a cabo dentro del medidor es exactamente el mismo que se ha descrito para el medidor de PAR. Como el sensor del medidor es un ISFET que genera voltaje por efecto del nivel de pH de la sustancia donde ha sido sumergido, el medidor registra el voltaje generado y le asigna el valor de pH de la sustancia medida; al proveerle tres puntos diferentes de pH vs voltaje, el medidor calcula la recta de calibración y en base a eso despliega la medición en su pantalla. Adicionalmente, el voltaje generado por el ISFET es acondicionado análogamente para compensar los errores derivados de la temperatura y queda disponible para ser leído de la salida análoga del medidor.

Para obtener la curva de calibración a utilizar dentro de la computadora, se realizó la calibración del IQ240 para tres buffers como se indica en su manual de usuario y al mismo tiempo los voltajes de su salida análoga fueron almacenados. La recta de calibración que se obtuvo se muestra en la Figura 28 y fue $y = -16.95x + 6.70$.

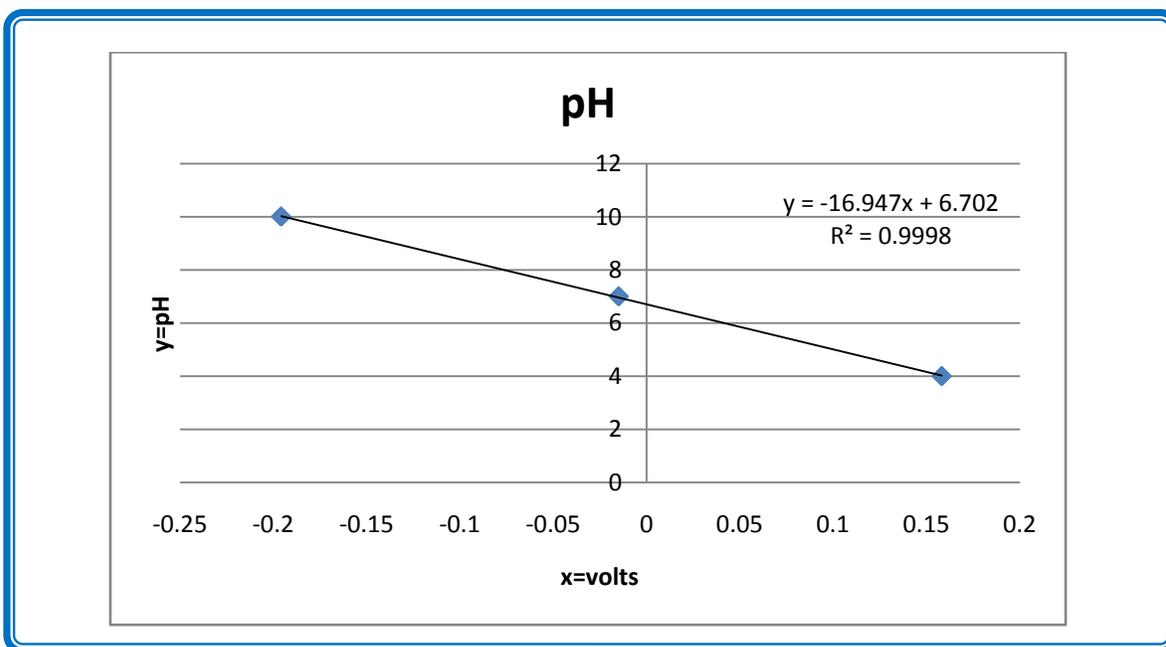


Figura 28 - Curva de Calibración para el Medidor IQ240

Nuevamente el valor de R^2 indica que la curva de calibración fue correctamente ajustada a una línea recta.

Medidor de Humedad, Conductividad Eléctrica y Humedad del Suelo HydraProbe II

Para el caso del HydraProbe II, que es un sensor digital, no existe posibilidad de generar una curva de calibración por parte del usuario. Debido a la complejidad de los procedimientos de calibración que involucran la correcta medición de la constante dieléctrica del suelo, que es el principio en que se fundamentan tanto la medición de conductividad eléctrica como la humedad del suelo, el fabricante no permite que el usuario intente crear sus propias curvas, pues es muy probable que genere una curva incorrecta. En su lugar, Stevens Water ha provisto al sensor digital con cuatro curvas de calibración que fueron diseñadas para que el sensor tome las mediciones correctas en diferentes tipos de suelos minerales sin que estas se vean afectadas por el contenido de materia orgánica, ya que esta varía incluso en el mismo tipo de suelo.

Siguiendo las recomendaciones del fabricante, se eligió la curva de calibración tipo Loam (Figura 29), ya que esta se ajusta de muy buena forma al tipo de suelo limo-arenoso que se tiene en las huertas de aguacate en Michoacán.

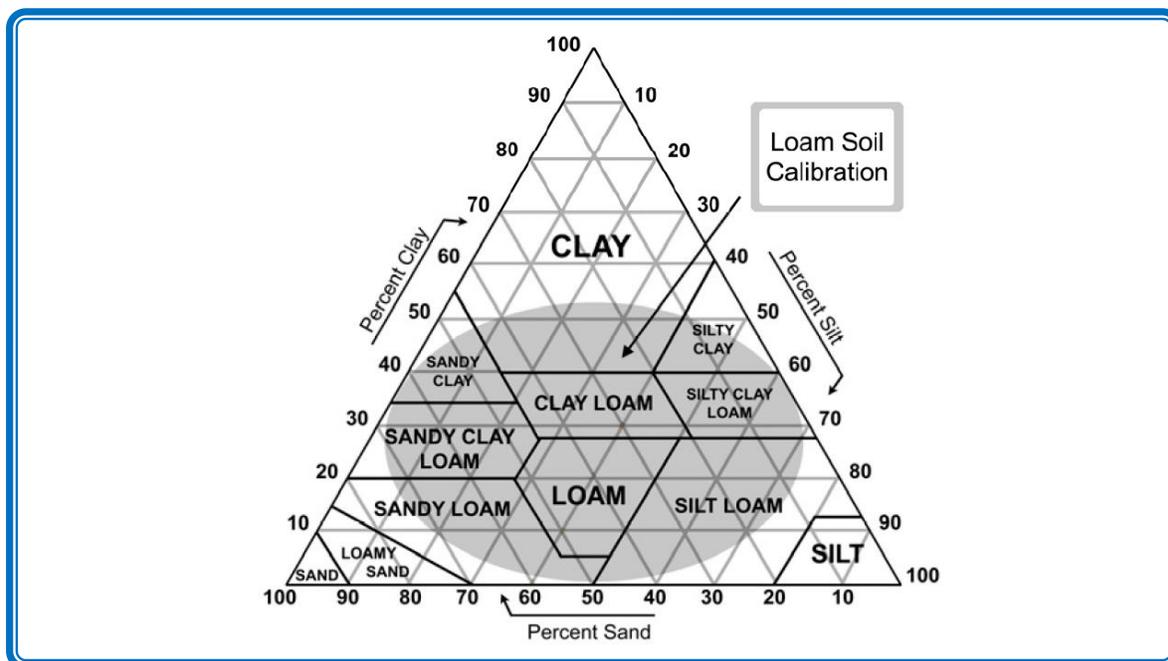


Figura 29 - Diagrama de Selección de Curvas de Calibración del Sensor HydraProbe II

En la sección de validación de las mediciones se demuestra que el sensor, utilizando la curva de calibración seleccionada, toma valores congruentes de medición.

Medidor de CO₂ en el Aire GMT 222

El medidor GMT 222 de Vaisala, similar a lo que sucede con el sensor HydraProbe II, no permite al usuario realizar una curva de calibración del instrumento, pues es sumamente complicado para un usuario común conocer el valor de ppm de CO₂ en el aire si éste no cuenta de antemano con otro instrumento para medir dicho valor; más aún, variar la concentración de ppm del aire es complicado si no se cuenta con estándares de referencia para calibración. En su lugar, Vaisala entrega el medidor ya calibrado bajo los estándares del Instituto de Mediciones de Holanda, junto con un certificado de calibración.

El GMT 222 adquirido para el LAICS tiene el certificado de calibración No.H24-08070053 donde se especifica que el instrumento tiene un error de medición de ± 20 ppm que queda dentro de las características especificadas por el instrumento. Adicionalmente, el manual de usuario asegura que el comportamiento de la salida de voltaje análogo del medidor tiene una no linealidad muy baja (± 5 ppm) y que la relación ppm vs voltaje se puede ajustar correctamente a la recta $y = 100x$.

Por estas dos razones la curva de calibración utilizada dentro de la aplicación correspondiente de LabView es la mencionada sin cambios mayores, únicamente su etapa de filtrado digital.

Medidor de Clorofila CCM-200

Dado que la medición de clorofila efectuada por el medidor CCM-200 se lleva a cabo utilizando luz, y la luz es una condición que varía constantemente en el entorno, la calibración del instrumento debe llevarse a cabo cada vez que éste se enciende.

En realidad la calibración del CCM-200 es sumamente sencilla, ya que consiste únicamente en cerrar el clip de medición. El proceso que se lleva a cabo dentro el instrumento es una referenciación a cero de los valores de luz que deben llegar de un lado del clip de medición (emisores a 635 y 931nm) al otro (receptores a 635 y 931nm) cuando no existe una hoja en medio y por lo tanto el contenido de clorofila es nulo (0 CCI). Partiendo de esa referenciación el medidor evalúa la relación entre la luz recibida a los 635nm (por efecto de la clorofila presente) y la luz recibida a los 931nm (por efecto del grosor de la hoja) y en base a eso calcula el contenido de clorofila. La Figura 30 describe brevemente el principio de medición utilizado por este medidor para que se entienda más a detalle el por qué no se permite más calibración del CCM-200 que la referenciación a cero.

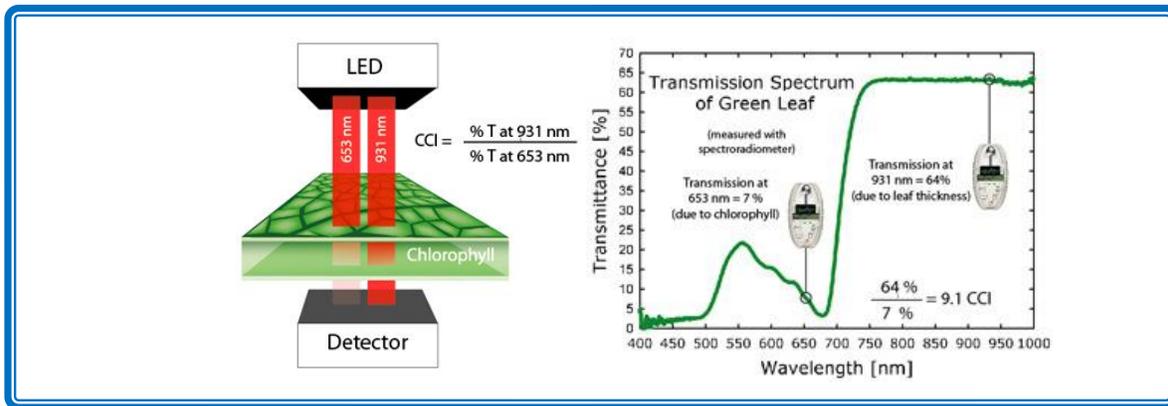


Figura 30 - Principio de Medición de Clorofila Utilizado por el Medidor CCM-200

Medidores de Nutrientes en Savia C-122, C-131 y C-141

Los tres medidores de nutrientes funcionan bajo un principio de medición muy similar al del medidor de pH. En este caso cada instrumento genera un voltaje proporcional a la concentración (en ppm) del compuesto medido presente en la savia utilizando electrodos selectores de iones, a diferencia del pH que utiliza un ISFET.

Así como el sensor es muy similar en funcionamiento, el procedimiento de calibración de los medidores de nutrientes es muy similar al llevado a cabo para el medidor de pH; esto es, se aplican soluciones con concentraciones conocidas a los electrodos para que se obtengan valores de ppm vs voltaje generado. La diferencia radica en que los medidores de nutrientes no cuentan con un microcontrolador, por lo que la recta de calibración se realiza de forma análoga (mediante el ajuste de potenciómetros) y únicamente en 2 puntos.

Después de calibrar los instrumentos de acuerdo a los procedimientos descritos en sus manuales y utilizando las soluciones estándar que el fabricante (Horiba) incluye con cada medidor, se realizó una validación de las mediciones realizadas midiendo nuevamente ambos estándares y se encontró que la calibración, aunque sencilla, es exitosa cada vez que se lleva a cabo. Más detalles se presentan en la siguiente sección.

Validación de las Mediciones Realizadas Después de Calibrar

Una vez que cada instrumento de medición fue calibrado de acuerdo a sus procedimientos y posibilidades, se realizaron mediciones que fueron desplegadas directamente en la computadora del LAICS, y se compararon contra las lecturas generadas por el medidor utilizado para calibrar cada instrumento. En la Tabla 2 se resumen los resultados de dichas pruebas.

Tabla 2 - Validación de las Mediciones de los Sensores Calibrados del LAICS

	Medición desplegada en la Interfaz de Usuario	Medición indicada por el Medidor Utilizado para la Calibración
PAR	1483.9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	1481 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Temperatura del Aire	21.2°C	21.2°C
Humedad Relativa del Aire	51.1%HR	50.5%HR
pH del Suelo	7.431	7.43
Humedad del Suelo	.404ml/kg	.400ml en 1kg de tierra
Cond. Eléctrica del Suelo	NA	NA
Temp. Suelo	22°C	22.2°C
CO ₂ del Aire	892.4ppm	890ppm
Nutrientes de Savia	2020ppm	2000ppm

En la Figura 31 se muestra el caso específico en que se compara la medición realizada por el sensor LQS70-10 (valor desplegado en la computadora después de que el sensor fue calibrado) contra la medición realizada por medidor LQM70-10, mismo que fue utilizado para calibrar el sensor.



Figura 31 - Validación de las Mediciones Realizadas por el LAICS (Medición de PAR)

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 2 e ilustrados en la Figura 31, se puede asegurar que los sensores y medidores integrados y calibrados para el LAICS funcionan correctamente y pueden ser utilizados para realizar mediciones en el campo con la confianza de adquirir información verdadera.

Más imágenes de la validación de las calibraciones se muestran en el [Apéndice F](#).

CAP5 – Pruebas de Campo

CAP5 – Pruebas de Campo

La investigación de esta tesis fue iniciada en su etapa de laboratorio en enero de 2008. Desde agosto del mismo año, la etapa de campo ha sido conducida en “La Enramada”, una huerta de aguacate de 45ha localizada en Tingüindín Michoacán México (19°44.886N, 102°29.758W).

Una vez que se completó la integración del LAICS (hardware y software) en los laboratorios del Departamento de Mecatrónica del ITESM Campus Monterrey, se realizaron las pruebas de campo que validan la correcta construcción y funcionamiento del sistema. En una primera ronda de pruebas un conjunto de ocho árboles que serán referidos como “árboles ideales” fueron medidos en las 13 variables que el LAICS puede medir. En una segunda corrida de mediciones, ahora un conjunto de 13 árboles fueron medidos, los mismos ocho árboles ideales de la primera ronda y otros cinco nuevos que serán referidos como “árboles débiles”. La primera ronda de mediciones fue llevada a cabo el 2 de agosto del 2008 y la segunda fue llevada a cabo el 28 de agosto del mismo año.

Selección de los Árboles

Para poder utilizar el LAICS como un sistema proveedor de retroalimentación para el lazo de control del árbol del aguacate, basado en los principios de la agricultura de precisión, es necesario que una característica principal sea exhibida por el sistema, esta es, la capacidad de realizar mediciones confiables y diferenciables para cada árbol de una huerta.

Con el objetivo de permitir al sistema LAICS cuantificar las diferencias medidas entre diferentes árboles, dos grupos de estudio fueron seleccionados en “La Enramada”. Mientras que un grupo contiene “árboles ideales”, y es suposición del autor que en dichos árboles los valores de las variables que puede medir el LAICS se encuentran dentro de un rango que debiera ser el óptimo; el otro grupo contiene “árboles débiles”, y en éstos árboles los valores medidos en las variables se encuentran en un rango que es diferente al óptimo.

La selección de ambos grupos de estudio fue realizado con la ayuda del ingeniero agrónomo José Ceferino Cortéz y el agricultor Miguel Salcido, quienes han trabajado con el árbol del aguacate por más de 15 años y conocen muy bien el comportamiento de los árboles en “La Enramada”.

Árboles Ideales

Como árboles ideales fueron seleccionados un conjunto de ocho árboles con una edad aproximada de 20 años. Estos árboles ideales exhiben características físicas que, de acuerdo a la

apreciación del ingeniero agrónomo y uno de los agricultores de “La Enramada”, representan claramente el cómo un árbol sano, bien cultivado y altamente productivo debe verse.

Las características específicas que se buscaron al seleccionar cada uno de los árboles fueron:

- 1.- La altura del árbol debe ser mayor a 8m y menor a 11m, este es un porte de árbol que facilita las prácticas de cultivo y cosecha sin un compromiso aparente de la cantidad de producción; un extenso tratado sobre la poda, dimensiones de la ornamenta del árbol y producción son presentadas por Matan Hadari (2004).
- 2.- Una densidad foliar entre abundante y muy abundante; las hojas son la fábrica de alimento y energía de un árbol, por lo que un mayor nivel de follaje permite una mayor fotosíntesis y esto conlleva a una elevada producción.
- 3.- Árboles que no presenten ni enfermedades ni plagas, ya que, a pesar de que la producción de un árbol se ve afectada de forma importante por estos dos factores, en este primer modelo de LAICS no se contempla el análisis de árboles enfermos o plagados.
- 4.- Un color verde vigoroso y saludable que indica que el árbol goza de buena salud y por lo tanto sus procesos fotosintéticos se están llevando a cabo eficientemente.
- 5.- Una producción estimada entre 250Kg y 300Kg, que para el estándar de producción los arboles en la huerta de la Enramada se considera como una producción elevada para un árbol.

Los árboles seleccionados además de servir para demostrar la capacidad del LAICS de tomar mediciones en diferentes árboles bajo condiciones similares, servirán para recolectar los valores de referencia que en un futuro (y en otra investigación) serán utilizados para homogeneizar el comportamiento de los árboles de la Enramada e incrementar su producción.

Árboles Débiles

Por otra parte, un grupo de cinco árboles y 20 años de edad, exhibiendo características físicas evidentes que representan cómo un árbol con baja producción debe verse.

Las características que dictaminaron la selección de este grupo de árboles fueron:

- 1.- Altura del árbol de entre 8m y 11m, igual a la seleccionada en los árboles ideales con el fin de que la deficiencia en producción no sea por efecto de la forma física del árbol.
- 2.- Una densidad de follaje media o baja, pues árboles que no tienen la vitalidad suficiente como para mantener su follaje, menos podrán tener elevadas producciones.
- 3.- Al igual que los árboles ideales, los árboles débiles no deben tener enfermedades ni plagas, para que la comparación entre ambos sea válida.
- 4.- Un color verde amarillento en el follaje del árbol, ya que esta es una clara indicación de que el árbol de aguacate no se encuentra en sus condiciones óptimas.
- 5.- Una producción de aguacate nula o casi nula, para contrastar más aún los grupos de comparación.

La intención de utilizar árboles tan distintos a los árboles ideales es precisamente demostrar que entre ambos grupos existen condiciones y factores limitantes que pueden ser cuantificados y diagnosticados por el LAICS.

Cabe mencionar también que la selección de la ubicación los 13 árboles de estudio (ocho ideales y cinco débiles) se realizó completamente al azar para evitar elegir árboles que se encuentren en zonas de influencia (positiva o negativa) de la huerta.

En la Figura 32 se puede apreciar la diferencia marcada que existe entre los árboles ideales y los árboles débiles que serán motivo de prueba del LAICS.



Figura 32 - Árbol Ideal (derecha) y Árbol Débil (izquierda)

División de los Árboles en Cuadrantes

Para realizar la medición de las variables de interés en cada árbol, se realizó una división del mismo en cuadrantes. Una razón para dividir el árbol en cuadrantes es que incluso siendo un mismo organismo, el árbol puede presentar diferentes comportamientos en diferentes secciones; por ejemplo, hay ocasiones en que un árbol presenta ramas secas o amarillentas en un área localizada y sin embargo, el resto del árbol está bien y con su producción intacta. Otra razón es que las actividades de cultivo del árbol no siempre son equitativamente distribuidas, por lo que se intensifican las diferencias dentro del mismo árbol.

La Figura 33 muestra como el árbol se dividió en cuatro cuadrantes con orientación al norte partiendo de una vista superior del árbol. Esta división fue contemplada en las aplicaciones programadas para el LAICS (Figura 23.B.1 a Figura 23.B.5), de forma que se almacenen valores medidos para cada uno de los cuadrantes propuestos para el árbol.

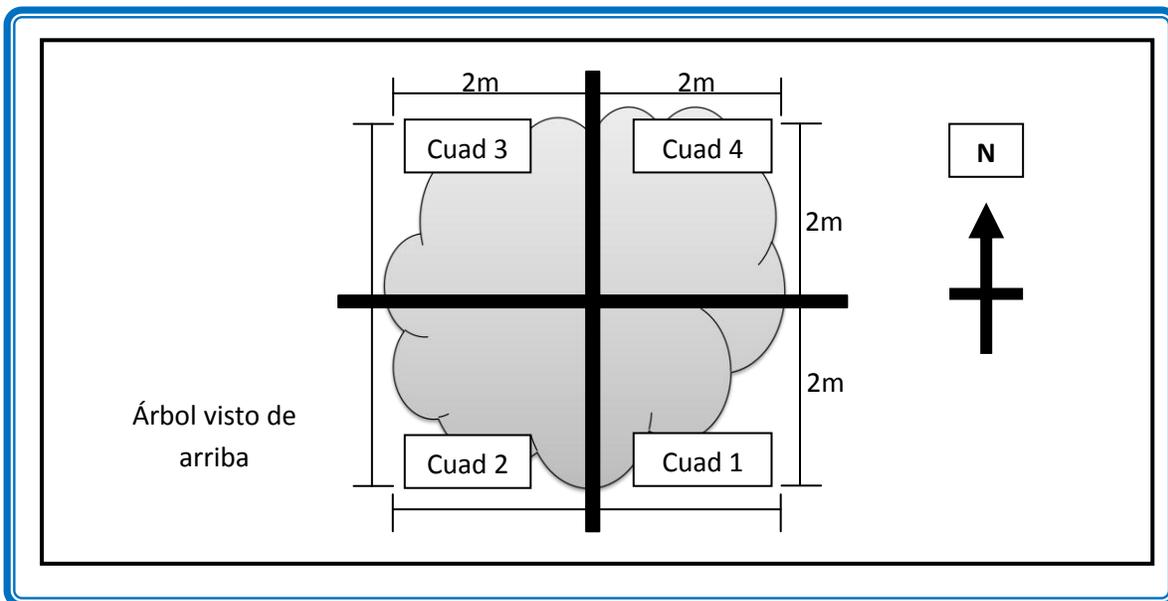


Figura 33 - División de los Árboles en Cuadrantes de Medición

Procedimiento de Medición

El procedimiento de medición se diseñó con dos ideas en mente; que fuera un procedimiento sencillo de ejecutar y recordar para poder llevarse a cabo sin mayores complicaciones, y, que tomara el menor tiempo posible por árbol para poder realizar la medición de varios árboles en una jornada de trabajo.

La Figura 34 describe gráficamente el proceso que se sigue para realizar, en un árbol de aguacate, la medición de 12 variables: CO₂, PAR, temperatura y humedad relativa del aire, pH, conductividad eléctrica, temperatura y humedad del suelo, NO₃⁻, Na⁺ y K⁺ en la savia y concentración de clorofila, además de la recolección automática de una muestra de suelo para análisis de laboratorio; todas las anteriores utilizando el LAICS.

El primer paso consiste en aproximarse con el LAICS al árbol que se desea medir (Figura 34.1). En el vehículo Gator TH6X4 se transportan todos los equipos de medición y dos personas de las cuales una opera el sistema LAICS y la otra ayuda en las actividades derivadas de la recolección de información. Una vez en el árbol de interés, el ayudante de medición utiliza una pala para aflojar un volumen de tierra de aproximadamente 1cm³ (Figura 34.2) en la ubicación de cada uno de los cuadrantes del árbol (previa ubicación del norte); mientras tanto, el operador del LAICS inicializa la medición de un nuevo árbol dentro de la aplicación Mobile Avocado Measurement Lab (Figura 23.B). Utilizando la pértiga de mediciones, en donde se encuentran montados cuatro dispositivos de medición responsables de siete de las 12 mediciones totales, se encaja el HydraProbe II en la sección floja de suelo del cuadrante 1 (Figura 34.3), se sostiene la pértiga verticalmente para que los sensores localizados en su parte superior (Figura 34.4) queden a una altura de 2.5m del suelo y se oprime el botón “tomar medición” localizado en el medio de la pértiga; sin mover de lugar la pértiga se oprime el botón otras tres veces para conseguir un total de cuatro mediciones de siete variables para el cuadrante 1 del árbol (Figura 34.5). Cuando la operación anterior ha sido realizada para los cuatro cuadrantes se activa el muestreador automatizado de suelos (Figura 34.6) y mientras opera, se toman las mediciones de clorofila por parte del operador del LAICS (Figura 34.7). Para las mediciones de clorofila se elijen 6 hojas (en cada cuadrante) localizadas inmediatamente arriba de la sección donde el suelo fue aflojado, se les realizan 4 mediciones de clorofila a cada hoja y con ayuda del asistente de medición se almacenan las hojas en bolsas separadas que identifican el árbol y el cuadrante del que provienen las hojas, esto con el objeto de posteriormente realizar el análisis de nutrientes en la savia. Al terminar la medición de clorofila se conecta el medidor CCM-200 a la computadora y se descarga la información recopilada; mientras tanto, el asistente de medición recolecta 30g de tierra de cada cuadrante que deposita en recipientes plásticos desechables. La tierra, que proviene del suelo que fue aflojado en un inicio, es mezclada con 30ml de agua destilada para formar una solución 1 a 1 y de esta forma facilitar la medición de su nivel de pH. A continuación se inserta el electrodo de medición del medidor IQ240 en cada uno de los recipientes plásticos, se realizan 4 mediciones por recipiente (cuadrante) y se almacenan los datos (Figura 34.8). Hasta el momento se han realizado

9 de las 12 mediciones posibles y se ha recolectado la muestra de suelo, restando únicamente las mediciones de nutrientes en savia, sin embargo, éstas se realizaron en una mesa de trabajo (no en campo) debido a la complejidad para extraer savia de los peciolo de la hoja del árbol de aguacate. Esto significa que con esos 9 valores medidos en cada cuadrante del árbol en turno, las mediciones de campo han terminado, por lo que el operador del LAICS almacena el árbol junto con todas sus mediciones, con ayuda del asistente de medición reagrupa aquellos sensores que estén fuera de lugar y maneja a un árbol nuevo para iniciar nuevamente el proceso de medición de campo.

Una vez que se ha concluido la jornada de mediciones de campo, se llevan las hojas recolectadas y etiquetadas a una mesa de trabajo, en donde, son lavadas con agua destilada para eliminar las impurezas (polvos y fertilizantes) que pudieran interferir con la medición de los nutrientes. A las hojas lavadas se les cortan los peciolo en longitudes de 5mm aproximadamente (Figura 35.1) y se depositan en una jeringa extractora de savia fabricada de nylamid (Figura 35.2); la jeringa es luego colocada en una prensa mecánica de 1ton que ayuda a presionar los peciolo lo suficiente como para obtener 3 gotas de savia (Figura 35.3). Las gotas de savia se depositan en papel filtro y se colocan en los medidores C-122, C-131 y C-141 para obtener los valores de nutrientes en la savia. Finalmente los valores medidos son introducidos manualmente a la computadora (Figura 35.4) utilizando la aplicación mostrada en la Figura 23.B.4 y con esto se completa la medición de las 12 variables y la muestra de suelo obtenidas del árbol en turno.

De la jornada de mediciones se recolectaron también diferentes muestras de suelo (150g) que tienen una etiqueta identificadora; en el caso del suelo, solo se recolecta una muestra de suelo por árbol y no una por cuadrante, pues el costo del análisis es elevado (\$500 MN) y la variabilidad esperada del suelo en un radio de 7m no es mucha. Las muestras son enviadas al laboratorio Ciclus en Uruapan Michoacán México para que un análisis nutricional sea llevado a cabo en ellas. Cuando los resultados de las muestras son devueltos (Figura 36), los valores de macronutrientes medidos (N, P, K, Ca, Mg y S-SO₄) se incorporan a la base de datos donde las mediciones de cada árbol están almacenadas y en ese momento se cuenta con un total de 18 valores medidos para cada árbol.

El tiempo total que toma llevar a cabo las mediciones de campo es de 10 minutos por árbol. El tiempo que toma llevar a cabo la medición de la savia para cada árbol es de 10 minutos también. El tiempo que toma al laboratorio realizar el análisis de 15 muestras de suelo es de 1 semana. Estos tiempos, si bien no son los más óptimos para un sistema que preferentemente debiera medir unos 1000 árboles al día, es una primera aproximación bastante aceptable a la medición rápida de 19 variables para cada árbol.

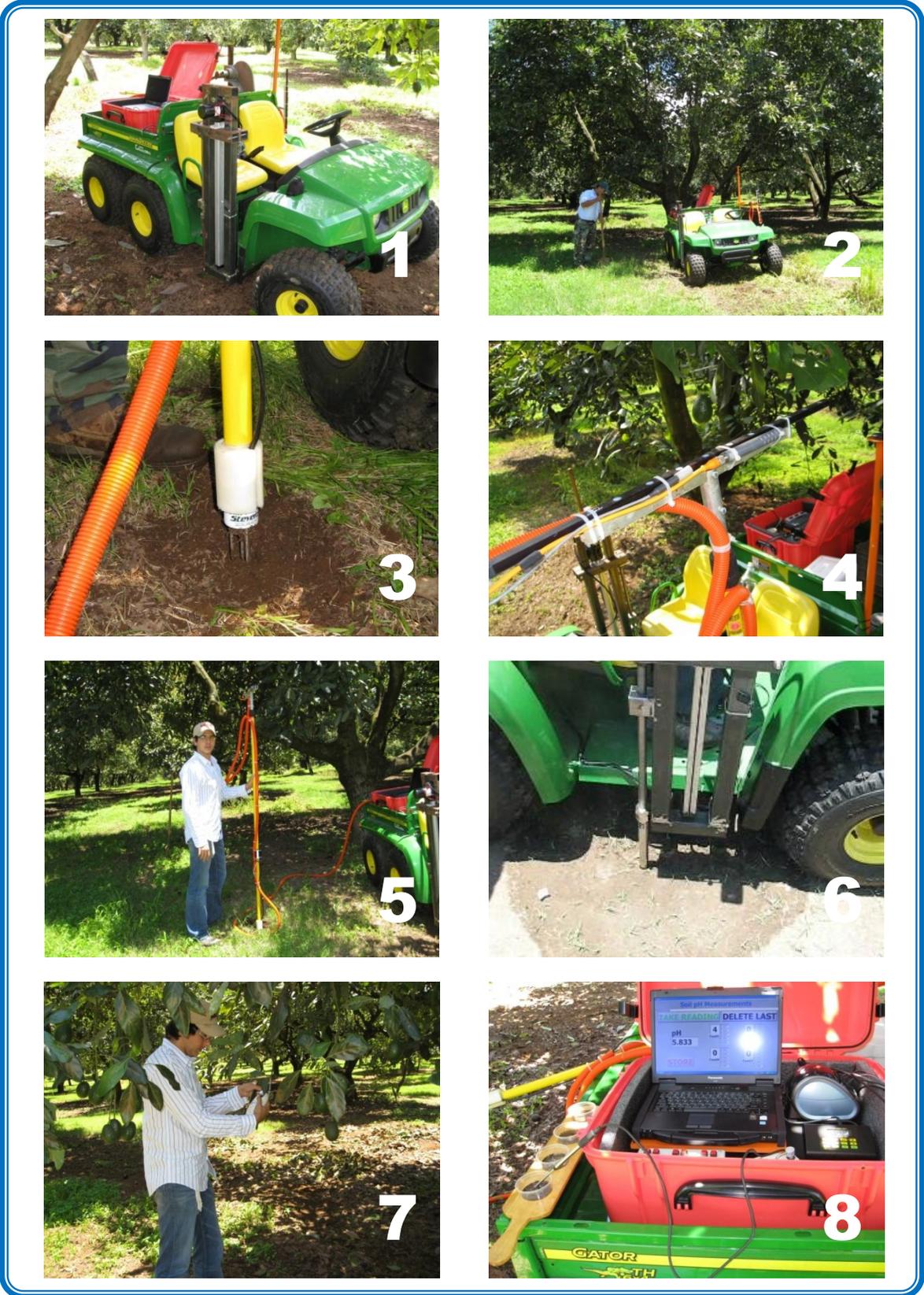


Figura 34 - Procedimiento de Medición del LAICS en Campo

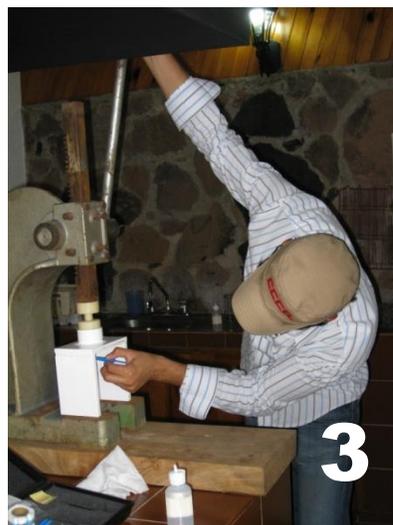


Figura 35 - Procedimiento de Medición de Savia del LAICS

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELO



Propietario Ing. José Alfredo Jiménez Muñoz Ledo
Predio La Enramada
Localización
Cultivo Aguacate Hass
Característica
Fecha 10 de Septiembre de 2008
Identificación BU 1 **Clave** SQ-573

	Prueba	Valor	Interpretación	Nivel Medio
Básico	pH	7.44	Neutro	5.5 - 6.4
	Conductividad eléctrica	0.50 dS m ⁻¹	Libre de sales	< 1
	Materia orgánica	6.30 %	Medio	4 - 8
	Capacidad de intercambio catiónico	25.04 cmol _c kg ⁻¹	Media	15 - 25
Macronutrientes	Nitrógeno orgánico	47.3 mg kg ⁻¹	Medio	30 - 60
	Fósforo	5.0 mg kg ⁻¹	Bajo	20 - 30
	Potasio	1314.5 mg kg ⁻¹	Muy alto	200 - 300
	Calcio	3454.6 mg kg ⁻¹	Alto	1500 - 2500
	Magnesio	499.0 mg kg ⁻¹	Moderadamente alto	200 - 400
	Azufre (S-SO ₄)	35.9 mg kg ⁻¹	Moderadamente bajo	50 - 200
Micronutrientes	Hierro	44.2 mg kg ⁻¹	Moderadamente alto	20 - 40
	Manganeso	15.8 mg kg ⁻¹	Moderadamente bajo	20 - 40
	Zinc	5.8 mg kg ⁻¹	Medio	5 - 10
	Cobre	13.5 mg kg ⁻¹	Moderadamente alto	5 - 10
	Boro	2.3 mg kg ⁻¹	Moderadamente alto	1 - 2

ciclus_lab@yahoo.com.mx

Figura 36 - Resultado del Análisis de Suelo del Árbol BU1 Realizado por el Laboratorio Ciclus

CAP6 – Resultados y Discusiones

CAP6 – Resultados y Discusiones

Características de los Datos Medidos y Almacenados por el LAICS

Después de haber llevado a cabo la segunda ronda experimental de mediciones en “La Enramada” (el 28 de agosto del presente año), el LAICS había almacenado información sobre las variables medidas en 13 árboles, cinco de los cuales eran de los clasificados débiles y otros ocho clasificados como ideales.

Utilizando sus sensores y medidores, el LAICS puede recolectar directamente la información de 12 variables y almacenar una muestra de suelo para ser analizada en un laboratorio. Durante el trabajo de campo, se midieron (para los cuatro cuadrantes de cada árbol analizado) las 12 variables posibles junto con la información de latitud, longitud y elevación del árbol, lo que se traduce en un total de 51 datos relacionados a cada árbol. Si bien la cantidad de información recopilada es, para esta primera etapa de la investigación del LAICS, excesiva dado que no se realizarán por el momento diagnósticos comparativos de los árboles cuadrante a cuadrante sino por árboles como un total; en un futuro los valores por cuadrante que han sido almacenado almacenados servirán como historial de referencia para continuar con las investigaciones que se pretenden realizar con el LAICS.

Para facilitar el manejo de la información que recopiló el LAICS, se realizó un promedio de la información medida para cada variable en los cuatro cuadrantes del árbol, de esta forma se reducen de 51 a 15 datos almacenador por árbol; si se le agregan a esos 15 datos los seis valores del análisis de macronutrientes que entregó el laboratorio para cada muestra de suelo, se tienen finalmente 21 datos para cada árbol medido.

Es necesario tener en mente que, cada uno de los 21 valores medidos en un árbol proporciona la información numérica precisa que cuantifica la calidad de los factores limitantes del crecimiento y producción del árbol. Si los valores de cada variable se llevan, por efecto de las prácticas y actividades de cultivo aplicadas a cada árbol, hacia un punto de referencia óptimo establecido por investigaciones científicas competentes, entonces tanto el crecimiento como la producción del árbol deben verse favorecidos en gran medida.

En la Tabla 3 se presentan los 18 valores promedio provenientes de las mediciones del árbol y de los análisis de suelo del laboratorio, junto con sus respectivos valores de latitud, longitud y elevación. La sección de color naranja de la tabla corresponde a todos aquellos valores que son obtenidos directamente por los sensores y medidores del LAICS, esto es, son los valores que pueden obtenerse de forma casi instantánea mientras se opera el sistema en el campo. La sección de color verde contiene la información referente al contenido de macronutrientes del suelo,

recordando que esta información no fue generada por ningún sensor del LAICS, sino que fue generada por el laboratorio Ciclus, quien se encargó de analizar las muestras de suelo recolectadas y etiquetadas automáticamente por el LAICS. Adicionalmente, para efectos comparativos entre los árboles ideales y los árboles débiles, la sección inferior de la Tabla 3 (color gris) muestra los valores promedio para cada conjunto de árboles medidos.

Tabla 3 - Valores Promedio de las Variables de Interés Medidos en 13 Árboles de Aguacate Hass

Árbol #	CO2 Ai	PAR Ai	TEMP Ai	HUM Ai	HUM Su	CE Su	TEMP Su	CCI Ho	NO3 Sa	Na Sa	K Sa	pH Su	N Su	P Su	K Su	Ca Su	Mg Su	SO4 Su	LAT	LON	ELEV
Aldeal1	394	457	28.9	46.5	0.330	0.0234	25.4	44.6	303	55	4250	6.52	47.30	5.00	1314.50	3454.60	499.00	35.90	1944.76944	10229.78568	1692.2
Aldeal2	406	142	29.3	46.4	0.337	0.0196	26.4	44.3	428	46	4700	6.90	57.30	2.20	1058.50	3508.40	546.80	7.50	1944.77522	10229.67953	1691.1
Aldeal3	397	79	30.4	43.2	0.310	0.0397	26.2	45.0	275	33	3225	7.13	50.90	2.50	1286.80	3814.90	498.50	24.10	1944.76543	10229.59541	1674.0
Aldeal4	471	199	21.0	66.7	0.367	0.0231	19.4	46.2	258	39	3250	7.13	60.60	5.60	990.90	3437.70	547.20	32.20	1944.75240	10229.64910	1669.9
Aldeal5	467	91	22.0	65.0	0.285	0.0310	20.0	51.9	213	34	2675	7.18	76.80	9.20	1067.50	4338.60	590.60	7.50	1944.75861	10229.64036	1680.9
Aldeal6	449	199	23.4	60.6	0.272	0.0270	21.1	52.6	263	48	3200	7.23	54.30	0.90	915.00	3040.30	430.70	35.90	1944.75310	10229.61828	1680.8
Aldeal7	449	532	26.8	50.8	0.299	0.0188	21.2	57.0	343	40	3425	6.68	56.60	1.30	1035.90	2711.00	414.30	18.70	1944.78117	10229.57553	1669.0
Aldeal8	413	420	28.8	43.4	0.295	0.0305	22.6	53.2	455	42	4775	6.35	51.50	0.70	1379.50	2563.10	449.00	49.20	1944.77977	10229.57012	1673.0
Promedio	431	265	26.3	52.8	0.312	0.0266	22.8	49.3	317	42	3688	6.89	56.91	3.43	1131.08	3358.58	497.01	26.38			
Árbol #	CO2 Ai	PAR Ai	TEMP Ai	HUM Ai	HUM Su	CE Su	TEMP Su	CCI Ho	NO3 Sa	Na Sa	K Sa	pH Su	N Su	P Su	K Su	Ca Su	Mg Su	SO4 Su	LAT	LON	ELEV
ADébil1	409	872	26.8	48.2	0.337	0.0234	22.8	43.0	273	73	2125	7.34	55.10	26.20	1600.50	4138.20	618.00	24.10	1944.78578	10229.81701	1685.8
ADébil2	403	673	27.9	47.9	0.310	0.0188	22.6	35.0	328	46	4200	7.43	52.50	9.00	1491.80	4131.90	498.90	9.20	1944.80276	10229.77742	1700.0
ADébil3	388	1338	36.1	29.4	0.367	0.0429	24.9	35.7	330	68	3200	6.95	36.50	16.50	1426.10	3871.30	472.10	63.10	1944.80777	10229.73831	1691.4
ADébil4	405	1286	28.5	44.3	0.272	0.0231	27.1	22.2	185	56	1950	6.77	51.90	17.90	1729.50	3280.50	575.40	17.00	1944.78761	10229.70233	1682.3
ADébil5	434	884	29.6	42.3	0.299	0.0180	26.5	35.6	230	80	2625	6.93	45.30	10.90	1384.10	3840.40	478.30	53.10	1944.81224	10229.68527	1683.3
Promedio	408	1011	29.8	42.4	0.317	0.0252	24.8	34.3	269	65	2820	7.08	48.26	16.10	1526.40	3852.46	528.54	33.30			

CO2 Ai (ppm) – Concentración de CO₂ en el aire

PAR Ai (μmol m⁻² s⁻¹) – PAR en el aire

TEMP Ai (°C) – Temperatura en el aire

HUM Ai (%RH) – Humedad relativa en el aire

HUM Su (m³ m⁻³) – Humedad del suelo

CE Su (S/m) – Conductividad eléctrica del suelo

TEMP Su (°C) – Temperatura del suelo

CCI Ho (CCI) – Concentración de clorofila en las hojas

NO3 Sa (ppm) – Nitrato en la savia de hojas

Na Sa (ppm) – Sodio en la savia de hojas

K Sa (ppm) – Potasio en la savia de hojas

pH Su (pH) – Nivel de pH del suelo

N Su (mg kg⁻¹) – Nitrógeno orgánico del suelo

P Su (mg kg⁻¹) – Fósforo del suelo

K Su (mg kg⁻¹) – Potasio del suelo

Ca Su (mg kg⁻¹) – Calcio del suelo

Mg Su (mg kg⁻¹) – Magnesio del suelo

SO4 Su (mg kg⁻¹) – Azufre del suelo

LAT (ddmm.mmmmm) – Latitud

LON (ddmm.mmmmm) – Longitud

ELEV (m) – Elevación sobre el nivel del mar

Una vez comprendida la procedencia y las características de los valores presentados en la Tabla 3, se pueden presentar los análisis realizados a dicha información.

Valores de los Datos Medidos y Almacenados por el LAICS

Un primer aspecto importante que puede observarse en los renglones de promedios de la Tabla 3 es que, como se esperaba, los valores de las mediciones realizadas en los árboles ideales son, en la mayoría de los casos, diferentes de aquellos débiles. Esto indica que existen un conjunto de condiciones óptimas que benefician en mayor medida a los árboles ideales, condiciones que pueden ser medidas utilizando el LAICS.

Al realizar un comparación de los valores medidos por el LAICS (variable a variable) entre árboles ideales y árboles débiles, existen varios puntos que es conveniente señalar con la intención de enfatizar las diferencias existentes entre ambos tipos de árboles: 1.- La concentración de CO₂ en los árboles débiles fue un 5.3% (408 vs 431ppm) menor que en los ideales. Una posible explicación para éste fenómeno es que la mayor cantidad de follaje de los árboles ideales conlleva a una mayor tasa de respiración y por ende, mayor expulsión de CO₂. Otra posible causa es que en los árboles que tienen poco follaje existe un flujo de aire mayor que elimina el CO₂ expulsado durante la fase oscura de la fotosíntesis. 2.- La radiación fotosintéticamente activa en los árboles ideales es tan solo el 26.2% (265 vs 1011 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) de la radiación medida en los árboles débiles. Esto tiene sentido ya que los arboles débiles tienen menos follaje, por lo tanto una cantidad mayor de luz pasa a través de ellos, lo que señala que no necesariamente a mayor luminosidad en un árbol se puede obtener el mayor nivel de fotosíntesis. 3.- La temperatura del aire en los árboles débiles resultó ser 3.5°C (29.8 vs 26.3°C) mayor que en los árboles ideales. Posiblemente la radiación solar excesiva derivada de la falta de follaje de los árboles débiles sea la principal causa de esta diferencia. Otra causa que debe ser evaluada en futuras mediciones es la diferencia de horario de las mediciones realizadas, ya que la temperatura ambiente varía mucho en un lapso de 3 horas, por ejemplo de las 6am a las 2pm. 4.- La humedad relativa fue 10.4%HR (52.8 vs 42.4%HR) mayor en los árboles ideales. Se asume que la causa de esto es la elevada tasa de respiración que presentan los árboles con mayor follaje, sin embargo al igual que con la temperatura, la diferencia de horario de las mediciones puede estar influenciando las mediciones. 5.- La conductividad eléctrica y humedad del suelo no muestran diferencias significativas. La explicación para la similitud en la humedad del suelo es que las mediciones se hicieron una vez avanzada la estación de lluvias, por lo que en general los suelos de diferentes regiones están saturados de agua en valores similares; respecto a la conductividad eléctrica se puede concluir que en general el suelo de todos los árboles es homogéneo en su nivel salino. 6.- En los árboles ideales, que son sanos y verdes, la concentración de clorofila es 30.4% (49.3 vs 34.3CCI) más que en los árboles débiles, que son un tanto amarillentos. Los niveles de clorofila están directamente correlacionados con el color de las hojas del árbol, por lo que evidentemente árboles más verdes tienen mayor nivel de clorofila; de hecho, es el color el principio de medición del medidor de clorofila CCM200. 7.- Los niveles de NO₃⁻ y K⁺ en la savia de los árboles ideales están 15.1% (317 vs 269ppm) y 23.5% (3688 vs 2820ppm) por encima de los niveles de los árboles débiles. Una explicación muy sencilla para

estos valores es que simplemente los árboles ideales se encuentran en un mejor estado nutricional; pudiera ser que los árboles débiles tengan algún tipo de incapacidad de absorción de nutrientes derivada de un problema de raíces o de deficiencia nutricional del suelo. 8.- El valor de pH para los árboles ideales resultó ser 0.19 unidades de pH (6.89 vs 7.08pH) menor que en los débiles. En este caso la diferencia de pH pudiera ser despreciable, pues ambos suelos se encuentran en un rango de valores muy cercano al neutral, lo cual es recomendable para este tipo de cultivos. 9.- De los tres macronutrientes principales del suelo, sólo el nitrógeno orgánico existe en un 15.2% (56.91 vs 48.26 mgkg⁻¹) más en los árboles ideales que en los débiles, mientras que fósforo y el potasio son menores, 78.7% (3.43 vs 16.10 mgkg⁻¹) y 25.89% (1131.08 vs 1526.40 mgkg⁻¹) respectivamente. Una posible explicación para el comportamiento mostrado es que como los árboles ideales tienen mucha fruta en crecimiento, presentan una demanda mayor de dichos nutrientes y por lo tanto la concentración de éstos en el suelo se ha visto disminuida.

Todas las comparaciones recién presentadas, junto con sus posibles explicaciones, representan solo una pequeña parte del conjunto tan complejo de análisis que pueden llevarse a cabo una vez que se tienen valores concretos de las variables que limitan el crecimiento de los árboles de aguacate. Para poder entender completamente el comportamiento de cada variable medida en los dos tipos de árboles, las interrelaciones entre variables, y como éstas afectan específicamente a la productividad, es necesario llevar a cabo un estudio mucho más detallado que involucre, entre otras cosas, un número mayor de mediciones por árbol en periodos de tiempo mucho mayores (por ejemplo 3 años); actividades que no son contempladas como objetivos de esta tesis, pero que despiertan la inquietud de una investigación más detallada que se fundamente en el uso del LAICS como sistema proveedor de retroalimentación del árbol de aguacate.

El segundo aspecto importante a señalar es el que puede apreciarse en las columnas de latitud, longitud y elevación de Tabla 3. Al analizar por ejemplo la latitud y longitud del árbol ideal 7 (1944.78117, 10229.57553) y la del árbol ideal 8 (1944.77977, 10229.57012) se obtiene por triangulación lineal de ambas coordenadas que los árboles se encuentran a una distancia de 16m. Los árboles analizados se encuentran separados realmente a 15m (medición terrestre); el error de medición de 1m garantiza que el GPS es capaz de localizar correctamente árboles que se encuentren separados a una distancia de al menos 5m, distancia que en la mayoría de los casos es la mitad de la separación de los árboles en una huerta común de Michoacán.

Mapas GIS de Diagnóstico

El LAICS tiene 2 funciones principales, la medición y almacenamiento de las variables relacionadas con la producción del árbol de aguacate, y, la creación de mapas GIS en donde se

presentan tanto el estado actual de cada variable, como el diagnóstico comparativo de las mismas con respecto a un valor de referencia.

Los mapas GIS que presentan el estado actual de cada variable medida, son una representación gráfica en donde cada árbol es presentado como un círculo de color. Cada círculo (árbol) es dibujado en el mapa con la localización que tiene en la superficie terrestre utilizando sus coordenadas geográficas. El color de cada círculo representa, de acuerdo a una escala colorimétrica, el valor que tiene cada árbol para la variable medida. La Figura 37 muestra tanto la ubicación, como el estado actual del NO_3^- de los 13 árboles analizados, en otras palabras, la Figura 37 muestra todos valores presentados en la columna NO_3^- de la Tabla 3 en forma de círculos de colores que pueden ser referenciados con la barra colorimétrica de la derecha.

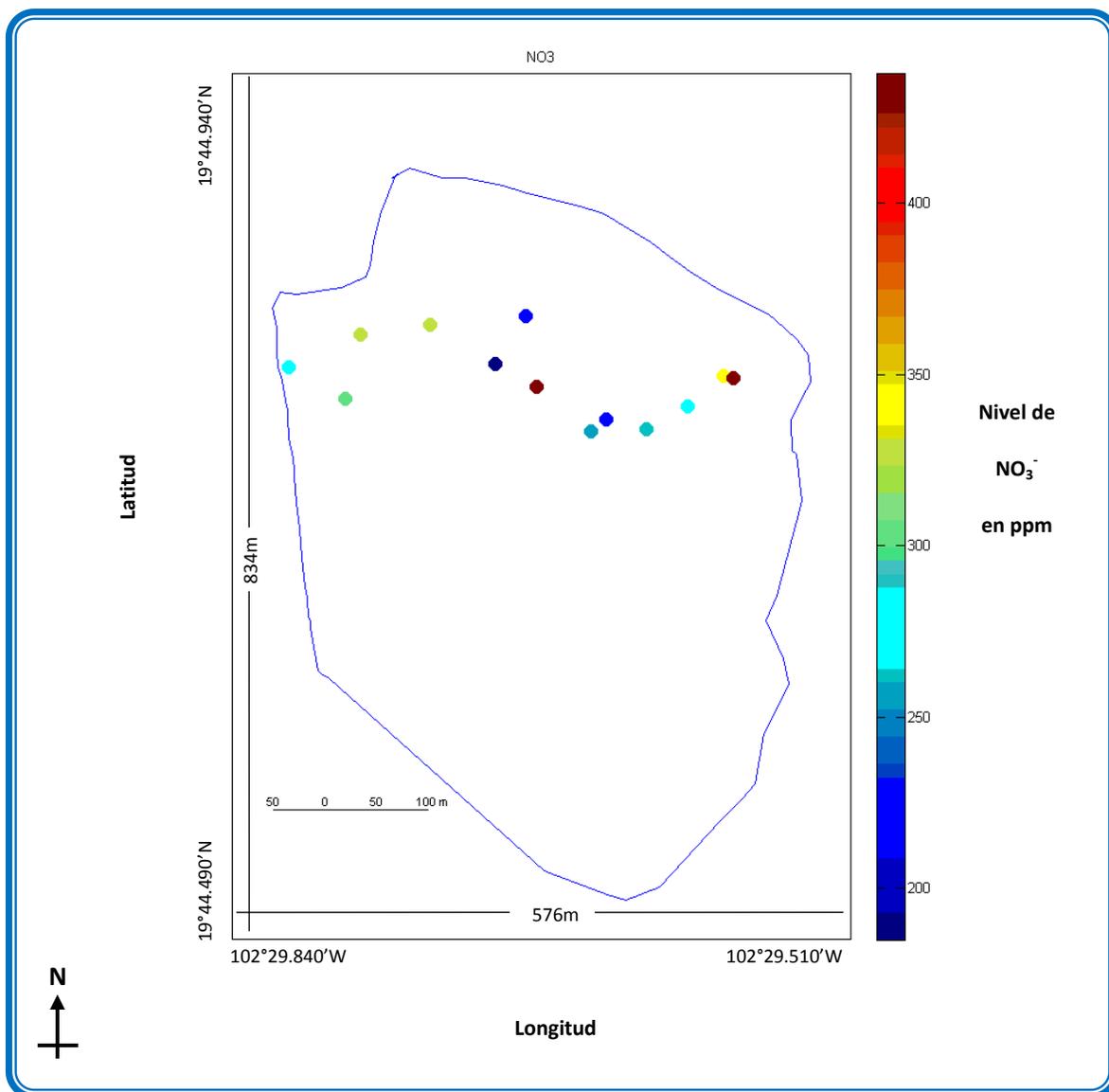


Figura 37 - Mapa GIS del Estado Actual del Valor de NO_3^-

La idea de utilizar este tipo de mapas es proporcionar al productor de aguacate una imagen espacial del comportamiento de sus árboles. Los mapas GIS son sencillos y rápidos de comprender pues el cerebro humano interpreta más rápidamente las imágenes que las tablas de números; por ejemplo, la barra colorimétrica indica que el círculo localizado en la extrema izquierda tiene un valor de 275ppm, dato que puede ser validado al revisar el renglón del árbol ideal 3 de la Tabla 3.

En el caso del mapa presentado, que corresponde a la superficie de 45ha de la huerta la Enramada, los 13 árboles analizados parecen ser muy poca información y quizá no ayudan al productor a darse una idea del estado general de su huerta, pero, si el mapa presentara todos los árboles contenidos en la huerta, sería muy sencillo identificar el comportamiento generalizado de la misma y quizá podrían descubrirse zonas donde el NO_3^- no está siendo eficientemente asimilado por los árboles, permitiendo a los agricultores realizar actividades correctivas sobre las zonas específicas (agricultura de precisión).

El otro tipo de mapas GIS generados por el LAICS es quizá más interesante para los productores de aguacate. Los mapas de diagnóstico comparativo operan bajo el mismo principio ya descrito, con la diferencia de que la barra colorimétrica del mapa no está escalada dentro de los valores máximos y mínimos medidos, sino que está escalada utilizando un valor de referencia predeterminado, de esta forma todos los valores medidos son referenciados contra ese valor.

La Figura 38 presenta el mapa de diagnóstico para el NO_3^- . En este caso, el valor de referencia utilizado, que se considera como el valor ideal de concentración de NO_3^- en la savia del árbol de aguacate Hass, es de 430ppm (Tapia, Aguilera, Rocha, Cruz, & Castellanos, 2003).

Del mapa GIS de diagnóstico puede observarse de forma clara y sencilla que todos aquellos puntos cuyo color es más cercano al rojo, tienen una deficiencia significativa en su nivel de NO_3^- en la savia, mientras que todos aquellos puntos en los que el color es casi amarillo contienen el nivel de NO_3^- recomendado. Una vez que se tiene un mapa de este estilo, el productor de aguacate puede tomar decisiones y ejecutar acciones de cultivo específicas que le ayuden a sus árboles a alcanzar el color amarillo (nivel deseado); acciones entre las cuales, además de la aplicación de nitrógeno en el suelo, estarán futuras mediciones del valor de NO_3^- utilizando el LAICS.

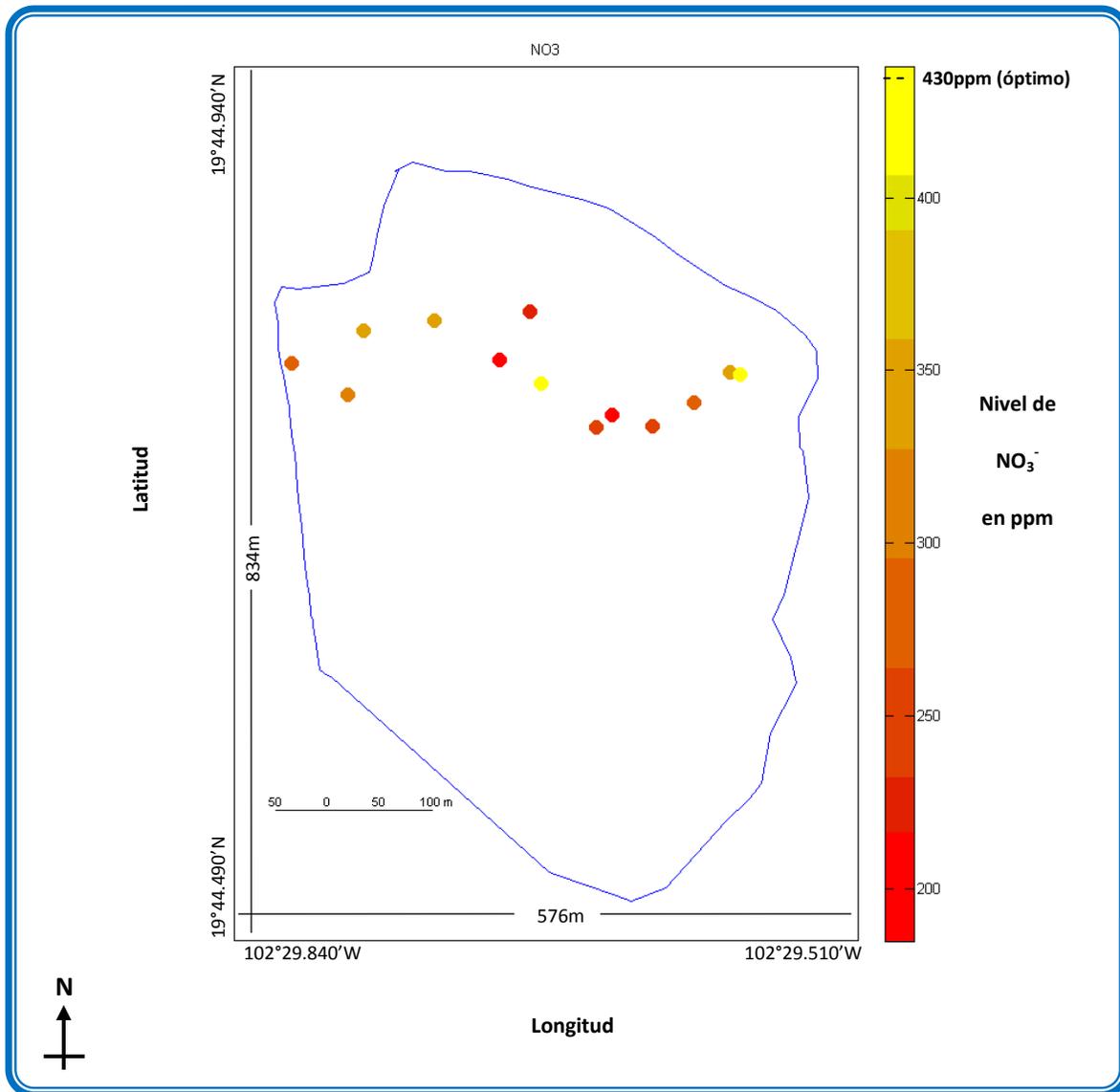


Figura 38 - Mapa GIS de Diagnóstico para el NO_3^-

Los dos tipos de mapas generados por el LAICS sin lugar a duda representan una herramienta que complementa el funcionamiento del sistema semiautomatizado de medición, ya que los datos medidos sin ningún tipo de análisis constituyen solo datos, mientras que los mapas presentan esos datos de forma ordenada y útil.

CAP7 – Conclusiones Discusivas y Trabajo Futuro

CAP7 – Conclusiones Discusivas y Trabajo Futuro

Conclusiones Discusivas

En el presente desarrollo de tesis se diseñó, construyó e implementó un equipo de campo móvil instrumentado para la medición y diagnóstico de variables agrícolas involucradas en la producción de aguacate hass. El nombre de dicho sistema completo es LAICS por sus siglas en inglés Líder Avocado Investigation System.

La invención presentada constituye una nueva herramienta tecnológica, de diseño mexicano, que tiene como fin último el incrementar la productividad de los árboles de aguacate e inclusive otros árboles frutales. Esto probará, en un futuro, que el campo mexicano puede y debe verse beneficiado con el desarrollo de nuevas tecnologías como lo es el LAICS.

Por su parte, el LAICS ha demostrado claramente que un vehículo todoterreno puede ser instrumentado para medir variables agrícolas involucradas en la producción de aguacate sin comprometer la calidad y precisión de las mediciones. Si bien, el procedimiento de medición actual es relativamente lento, pues tarda alrededor de 10 minutos en el trabajo de campo de cada árbol y otros 10 minutos en el trabajo de medición de los nutrientes en savia; la importancia primaria del LAICS radica en su habilidad de eficientemente integrar la medición de un número de variables nunca antes medidas en conjunto por ningún otro aparato. La integración de dichas mediciones incluyó además de un proceso de medición conjunto y semiautomatizado, la capacidad de almacenar automáticamente cada variable medida en una base de datos que incluye, entre otras cosas, la posición geográfica del árbol medido; de tal forma que la base de datos generada por el LAICS puede ser interpretada y utilizada con cualquier software GIS dedicado al análisis y diagnóstico agrícola, incluyendo el programado para el mismo LAICS.

También se confirmó que el LAICS tiene la capacidad de detectar variaciones al medir árboles diferentes, tanto entre árboles ideales y débiles (caso evidente) como entre aquellos del mismo tipo (caso complejo). Con lo anterior se prueba que el LAICS puede ser utilizado para aplicar los principios de agricultura de precisión al cuidado de las huertas de aguacate; esto es, asignar a cada árbol de aguacate de una huerta, exactamente el cuidado que necesita para mejorar su productividad.

Finalmente, con el uso de la aplicación de mapas GIS programada, se comprobó que tanto el estado actual como el diagnóstico comparativo de un conjunto de árboles de aguacate en forma de mapas GIS, puede ser sugerido a partir de la información recolectada por el sistema de medición semiautomatizado del LAICS. Esta última característica le permite al LAICS ser una herramienta de trabajo completa, ya que no solo realiza las mediciones de las variables de interés en conjunto, sino que sin la necesidad de aplicaciones externas, puede generar un diagnóstico del árbol.

Trabajo Futuro

Como producto del elevado número de variables medidas en cada árbol se ha obtenido, en este primer prototipo, un tiempo de medición relativamente elevado, por lo que resulta poco probable poder analizar huertas completas en tiempos lógicos (1 semana por ejemplo). Con tal conocimiento, una revisión completa de los procedimientos de medición seguidos, así como un reacondicionamiento de los sensores y medidores del LAICS debe ser llevada a cabo para disminuir sustancialmente el tiempo de medición requerido por árbol.

Dado que el funcionamiento completo del LAICS, tanto en el proceso de toma de mediciones como en el proceso de generación de mapas GIS, es conocido a detalle únicamente por el autor, será necesario llevar a cabo la redacción de un manual de usuario del sistema, esto para que el LAICS pueda ser operado por personal técnico no necesite tener un nivel de especialización excesivo.

En este trabajo se utilizó una clasificación de los árboles (ideales y débiles) bajo un criterio de selección un tanto empírico. Es necesario desarrollar una metodología que permita clasificar los árboles medidos de forma cuantitativa y ponderada. Para este propósito el LAICS será una herramienta que deberá ser utilizada.

Finalmente, una investigación continua sobre nuevos dispositivos y tecnologías de medición que puedan sustituir a las actualmente utilizadas debe estarse llevando a cabo constantemente, de tal forma que se asegure que el LAICS no se convierta en una herramienta obsoleta, lenta e imprecisa al operar.

Bibliografía y Referencias

- Adamchuka, V., Lundb, E., Sethuramasamyraja, B., Morgan, M. T., Dobermann, A., & Marx, D. (2005). Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. *Computers and Electronics in Agriculture* 48 , 272-294.
- Biber, P. (2007). Evaluating a Chlorophyll Content Meter on Three Coastal Wetland Plant Species. *Agricultural, Food and Environmental Sciences* 2 , 1-11.
- Blanchard, M. G., & Runkle, E. S. (2006). Temperature during the day, but not during the night, controls flowering of *Phalaenopsis* orchids. *Journal of Experimental Botany* 57 , 4043–4049.
- Bodner, G., Strauss-Sieberth, A., Loiskandl, W., & Kaul, H. (2008). Long-term meteorological and soil hydrology database, Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, United States. *Water Resources Research* 44 , W05S07.
- Dominguez V., A. (1996). La planta. Exigencias fisiológicas. In A. Dominguez V., *Fertirrigacion* (pp. 13-35). Madrid: Mundi-Prensa.
- Enciclopedia práctica de la Agricultura y la Ganadería.* (2000). Océano.
- Flocker, W., J, V., & Howard, F. (1959). Some Growth Responses to Tomatoes to Soil Compaction. *SSSA Proceedings* , 23-188.
- Folegatti, M., Blanco, F., Marcelli, R., Boaretto, R., & Boaretto, A. (2005). Calibration Of Cardy-Ion Meters To Measure Nutrient Concentrations In Soil Solution And In Plant Sap. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 62 , 8-11.
- Hadari, M. (2004). *A Three-Dimensional Model of the Light Regime in an Avocado Orchard*. Master of Science of Agricultural Engineering Thesis, Israel Institute of Technology, Water, Soil and Environmental Engineering, Haifa.
- Heath, R., & Arpaia, M. (2006). Avocado Tree Physiology – Understanding the Basis of Productivity. *Proceedings of the California Avocado Research Symposium* (pp. 93-107). Riverside: University of California Dept. of Botany and Plant Sciences.
- Hofshi, F. (2006). *Avocado Source*. Retrieved 08 31, 2008, from World Wide Avocado Data: <http://www.avocadosource.com/>
- Kohlbrandt, Wang, D., & Fujiyoshi, Y. (1994). Atomic Model of Plant Harvesting cComplex by Electron Crystallography. *Nature* , 614-621.
- Konica, M. (2003). SAPD-502 Chlorophyll Meter. Osaka, Japan: Konica Minolta Sensing Inc.

- Landis Fisk, C. (2006). *Investigation of Postharvest Quality and Storability of Hardy Kiwifruit (Actinidia arguta 'Ananasnaya')*. Connie Landis Fisk.
- Letey, J., Stolzy, L., & Lunt, O. (1961). Plant Growth, Water Use, and Nutritional Response to Rhizosphere Differentials of Oxygen Concentrations. *SSSA Proceedings* , 25-183.
- Maldonado, R., Álvarez, M., Almaguer, G., Barrientos, A., & García, R. (2007, January). Estándares Nutrimientales para Aguacatero Hass. *Revista Chapingo Serie Horticultura 13* , pp. 103-108.
- Medina, D., Gomez, R., & Windler, J. (2003). Manejo del Riego del Aguacate Mediante el Uso de Dendrómetros. *Proceedings V World Avocado Congress* (pp. 273-281). Málaga: Viceconsejería Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Ogata, K. (2002). Introducción a los Sistemas de Control. En K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna 4ta Edición* (págs. 1-10). Prentice Hall.
- Šařec, O., Šařec, P., & Prošek, V. (2002). Measuring of soil electrical conductivity for mapping of spacial variability of soil properties within a field. *Research in Agricultural Engineering* , 131-136.
- SIAP. (2008). *Sistemas Producto*. Retrieved 08 31, 2008, from Indicadores Aguacate: http://www.campomexicano.gob.mx/portal_sispro/index.php?portal=aguacate
- Tang, J., Misson, L., Gershenson, A., Cheng, W., & Goldstein, A. (2005). Continuous measurements of soil respiration with and without roots in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada Mountains. *Agricultural and Forest Meteorology 132* , 212-227.
- Tapia, L., Aguilera, J., Rocha, J., Cruz, S., & Castellanos, J. (2003). Indices De Referencia Nutritional N, P Y K En Aguacate (Persea Americana, Mill) Var. "Hass" Bajo Fertirriego En Michoacán, Mexico. *Proceedings V World Avocado Congress* (pp. 401-407). Málaga: Viceconsejería Servicio de Publicaciones y Divulgación.
- Tisdale, S., & Nelson, W. (1988). *Fertilidad de los Suelos y Fertilizantes*. Mexico: Uteha.
- Vonlanthen, C., Bühler, A., Veit, H., Kammer, P., & Eugster, W. (2006). Alpine Plant Communities: A Statistical Assessment Of Their Relation To Microclimatological, Pedological, Geomorphological, And Other Factors. *Physical Geography 27* , 137-154.
- Watson, S., Segarra, E., Lascano, R., Bronson, K., & Schubert, A. (2005). Guidelines for Recommending Precision Agriculture in Southern Crops. *Journal of Extensions Vol 43* , Art 2.
- Whiting, D., Roll, M., & Vickerman, L. (June de 2007). Plant Growth Factors: Light. *Colorado Master Gardener Garden Notes* . Colorado, United States: Colorado State University Cooperative Extension.

Whiting, D., Roll, M., & Vickerman, L. (June de 2007). Plant Growth Factors: Water. *Colorado Master Gardener Garden Notes* . Colorado, United States: Colorado State University Cooperative Extension.

Whitmarsh, J., & Govindjee. (2007). *The Photosynthetic Process*. Recuperado el 25 de 02 de 2008, de The Paper: <http://www.life.uiuc.edu/govindjee/paper/gov.html>

Whorf, T., & C, K. (2005). *Atmospheric Carbon Dioxide Record from Mauna Loa*. Recuperado el 05 de 03 de 2008, de Trends: Atmospheric Carbon Dioxide: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm>

Wittwer, S., & Robb, W. (1964). En *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Atmospheres for Vegetable Crop Production* (págs. 18-334). Econ Botany.

Worley, R., Blaser, E., & Thomas, G. (1963). Temperature Effect on Potassium Uptake and Respiration by Warm and Cool Season Grasses and Legumes. *Crop Science* , 3-13.

Apéndices

APENDICE A – Muestreador Automático de Suelos

Con el objetivo de recolectar, envasar, georeferenciar y etiquetar una muestra de suelo, de forma semiautomatizada, se construyó el dispositivo cuyos componentes son mostrados en la Figura 39. En su conjunto, el muestreador automático de suelos está integrado por cuatro componentes principales: 1.- Una antena GPS, que indica la posición geográfica en donde se toma la muestra de suelo. 2.- Un dispositivo electro-mecánico, que utilizando un actuador eléctrico lineal (FA-400-TR-24-30) fabricado por la empresa Firgelli Automations, inserta (y extrae) un colector de muestras en el suelo, de esta forma una muestra de suelo queda envasada en un tubo de plástico. 3.- Una interface de control, que utilizando la computadora del LAICS, la tarjeta NI-USB6008 y una tarjeta de relevadores, controla el movimiento automático del actuador eléctrico, esto es, controla la recolección automática de la muestra de suelo. 4.- Una etiquetadora portátil, que imprime fecha y hora, posición geográfica y número de identificación para cada muestra tomada, de tal forma que la muestra de suelo envasada, pueda ser enviada a un laboratorio de análisis de suelos y que cuando los análisis de la misma estén listos, los valores recibidos puedan ser rápidamente incluidos en la base de datos de mediciones del LAICS.



Figura 39 - Diagrama Esquemático de los Componentes del Muestreador Automático de Suelo

APENDICE B – Resolución de Sensores Análogos Evaluada dentro de la Computadora

En la sección “Tarjeta de Adquisición de Datos” (Cap3 pág. 37) se mencionó que existen cuatro dispositivos (LQS70-10, TRH-100-50FT, GMT 222 e IQ240) que se encargan de obtener los valores de cinco variables, que dichos valores son entregados como un voltaje análogo, y que para poder leer esos voltajes análogos en la computadora es necesario utilizar las entradas análogas de la tarjeta de adquisición de datos NI-USB6008.

Es importante señalar que al momento de utilizar una tarjeta de adquisición de datos para leer un voltaje análogo, se está realizando una conversión de análogo a digital cuya resolución es la de la tarjeta, que en este caso es de 12bits. Lo anterior significa que el rango de voltaje que debe ser leído por una entrada de la tarjeta NI-USB6008 será dividido 4096 veces y por lo tanto, la lectura que se despliegue dentro de la computadora solo podrá ser uno de esos 4096 valores. Por ejemplo: si se quiere leer un voltaje análogo que vaya de 0 a 5VDC utilizando una de las entradas de la tarjeta NI-USB6008, la computadora será capaz de mostrar incrementos de voltaje únicamente cada 1.22mV (0, 1.22, 2.44, 3.66mV, etc.); la importancia de esto radica en que si se quiere que la computadora detecte cambios de voltaje menores a 1.22mV es necesario utilizar una tarjeta con mayor resolución.

Entendido lo anterior, se presenta en la Tabla 4 una comparación de la resolución que tienen los instrumentos en su operación análoga y la resolución que tienen los mismos una vez que son desplegados en la pantalla de la computadora.

Tabla 4 - Comparación de Resolución Análoga y Digital de los Sensores Análogos

Variable Medida	Resolución Análoga	Rango de Voltaje Análogo	Mínimo Cambio de Voltaje Generado	Resolución Digital
PAR	$1\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$	0.4VDC (en $2000\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.0002V (cada $1\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0.000122V (0.61$\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
Temperatura	0.01°C	5VDC (en 300°C)	0.00016V (cada 0.01°C)	0.00122V (0.076°C)
HR	1%HR	4VDC (en 100%HR)	0.034V (cada 1%HR)	0.00122V (0.035%HR)
CO ₂	0.6ppm	10VDC (en 2000ppm)	0.003V (cada 0.6ppm)	0.00244V (0.488ppm)
pH	0.0016pH	0.840VDC (en 14pH)	0.001V (cada 0.0016pH)	0.000244V (0.00039pH)

La resolución análoga se refiere a la capacidad que tiene el sensor de detectar el fenómeno que se está midiendo, esta es especificada por el fabricante. El rango de voltaje se refiere al valor mínimo y máximo de voltaje que puede entregar el sensor al medir la variable de interés. El mínimo cambio de voltaje generado es el valor más pequeño en que el fenómeno que está siendo medido puede modificar la salida de voltaje del sensor. La resolución digital es precisamente la división del rango de voltaje análogo en las 4096 divisiones que puede realizar la tarjeta utilizando sus 12 bits.

De los resultados presentados en la Tabla 4, se puede observar que exceptuando la resolución digital obtenida para la medición de temperatura, las resoluciones digitales de todas las otras variables medidas quedaron por debajo de las resoluciones análogas. Esto significa que la tarjeta de adquisición de datos es capaz de detectar los cambios mínimos que de forma análoga genera cada sensor. Por su parte la medición de temperatura, aunque pierde resolución al ser digitalizada, obtuvo un valor de resolución suficientemente aceptable (0.076°C) para el tipo de aplicación.

Como punto final es necesario comentar que para los sensores digitales (CCM-200, HydraProbe II y GPS18@5Hz) el valor medido es directamente entregado a la computadora como una palabra que es leída a través del puerto serial RS-232, por lo que los cálculos anteriores carecen de sentido.

APENDICE C – Sistema de Suministro de Energía del LAICS

Como se mencionó en la sección de “Fuente de Poder” (Cap3 pág.37), todos los dispositivos del LAICS son energizados utilizando la batería del Gator TH6X4, que es una fuente de voltaje de corriente directa de 12VDC. El problema de alimentar un conjunto de dispositivos distintos utilizando una única fuente de voltaje es que cada dispositivo necesita un voltaje de distinto para funcionar, por lo que para poder operar todos los dispositivos de LAICS, el voltaje de 12VDC de la batería debe ser convertido a 15VDC, 9VDC, 24VDC, 12VDC (regulado) y 5VDC. Para poder hacer esto existen 2 posibilidades: 1.- Utilizar 4 convertidores de voltaje de corriente directa a voltaje de corriente directa que generen los voltajes necesitados a partir de 12VDC; esta solución resultó ser poco práctica y muy costosa. 2.- Utilizar un inversor de voltaje que convierta de 12VDC a 120VAC y alimentar los dispositivos del LAICS con los convertidores de corriente alterna a corriente directa que cada dispositivo tiene de fábrica, de esta forma solo se compra un inversor de voltaje y se utilizan los convertidores por los que ya se ha pagado al comprar los instrumentos y medidores. Finalmente se decidió que la alimentación general del LAICS proviniera de un inversor de voltaje (AIMS 600 Watts Pure Sine Power Inverter) que genera una onda senoidal completa (mejor que la onda senoidal modificada) de 120VAC. El diagrama esquemático del sistema de suministro de energía se muestra en la Figura 40.

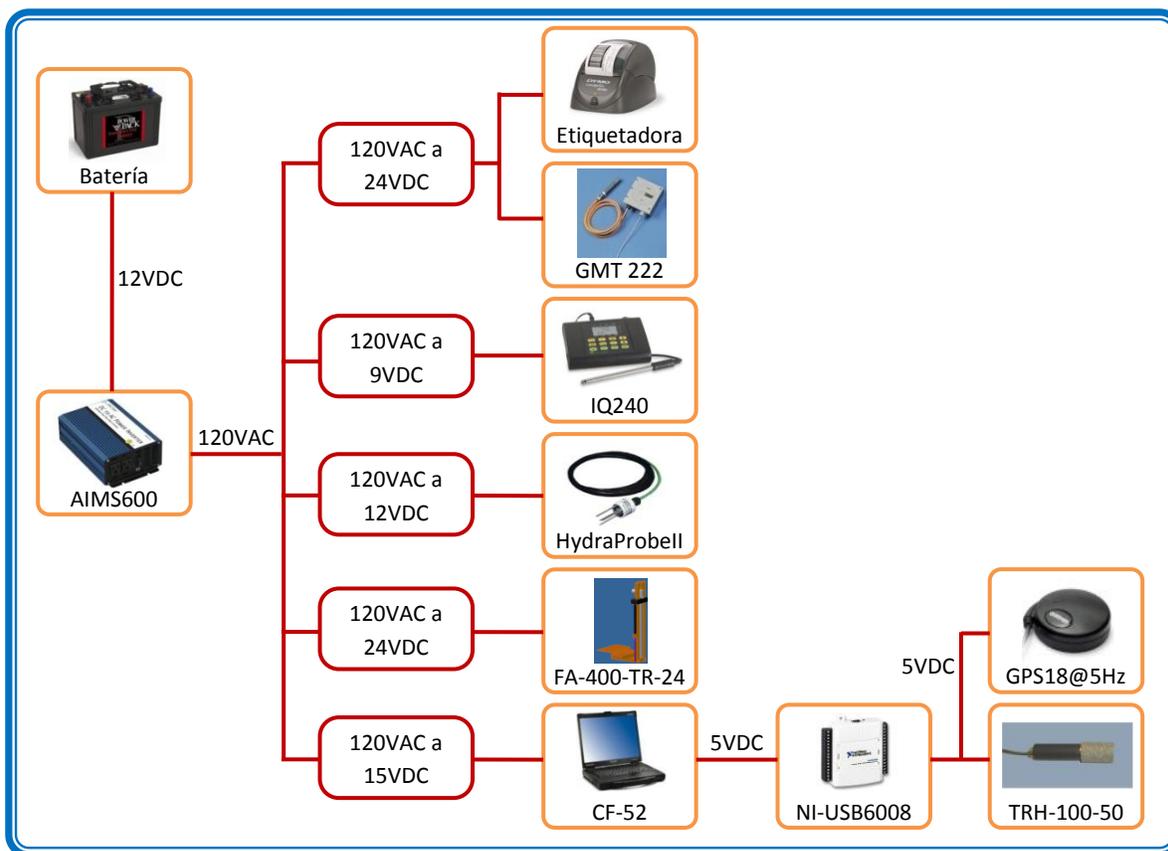


Figura 40 - Sistema de Suministro de Energía del LAICS

APENDICE D – Errores y Soluciones de la Integración del Hardware

Uno de los problemas derivados de la integración de hardware del LAICS está relacionado con la fuente de alimentación y los ruidos eléctricos derivados de ella.

La primera vez que se intentó probar el funcionamiento del muestreador de suelos automatizado del LAICS, se observó que los dos sensores de límite localizados en la parte superior e inferior del dispositivo sensaban erráticamente, ocasionando que el control automático del muestreador no funcionara (dado que se necesitan ambos sensores operando correctamente).

Los sensores del muestreador, al igual que todos los botones externos del LAICS, están conectados a las entradas digitales de las tarjetas NI-USB6008. Las entradas digitales fueron configuradas como activas en bajo (lo que significa que la entrada debe ser conectada a la tierra de la tarjeta NI-USB6008 cuando quieran ser activadas) y se programó una rutina dentro de las aplicaciones de LabView para eliminar los rebotes mecánicos derivados de presionar los botones o los sensores. No obstante la rutina de eliminación de rebotes funcionó perfectamente para todos los botones, los sensores del muestreador tenían el problema de sensar en más de una ocasión cuando eran presionados, o incluso, sensar sin siquiera ser presionados.

Lo anterior sucedía porque la pata de tierra física de la clavija del cargador de la computadora no estaba siendo conectada directamente al inversor de voltaje. Esto ocasionaba que la tierra de la tarjeta NI-USB6008, que es a donde se deben conectar las entradas digitales para ser detectadas y que es la misma tierra que la tierra de la computadora (pues la tarjeta se alimenta de voltaje y tierra directamente del puerto USB de la computadora), no fuera referenciada directamente a tierra física a través del cargador de la computadora; de esta forma el paso por cero (60 veces por segundo) del inversor de voltaje generaba una falsa referencia de tierra para la computadora y para la tarjeta, y esa falsa referencia se convertía en una falsa detección de los sensores del muestreador. El error se presentó únicamente en los sensores del muestreador pues ellos estaban siendo constantemente monitoreados mientras la aplicación de control del muestreador estaba siendo utilizada, permitiendo múltiples cruces por cero del inversor que ni siquiera la rutina de eliminación de rebotes podía cubrir. Una vez que se conectó la tierra física del cargador de la computadora directamente al inversor de voltaje, el problema se resolvió.

Por su parte los botones externos del LAICS no presentaron el mismo problema debido a que eran detectados únicamente cuando eran presionados, esto evitaba que sucedieran un número excesivo de cruces por cero del inversor y así la rutina de eliminación de rebotes programada lograba evitar múltiples detecciones.

APENDICE E – Programación de Interfaces de Usuario en LabView

La programación de las dos aplicaciones de software más importantes del LAICS se explican a detalle en esta sección.

La primera aplicación es la utilizada para recolectar la información del CO₂, PAR, temperatura y humedad del aire, la humedad, temperatura y conductividad eléctrica del suelo. Se considera a esta aplicación como una de las principales pues bajo el mismo esquema funcionan todas las encargadas de recopilar información de los sensores y medidores.

En la parte superior de la Figura 41 se puede apreciar el panel frontal de la aplicación en cuestión. En el panel frontal existen 7 campos designados a mostrar el valor actual de la medición en turno, estos se localizan en la parte lateral izquierda e inferior izquierda del panel; existen también 16 campos (parte central y lateral derecha) en donde se almacenan 4 mediciones para cada cuadrante del árbol y otros 4 campos que en esa misma sección muestran el valor promedio de las cuatro mediciones realizadas en cada cuadrante. El funcionamiento básico de la aplicación es el siguiente: 1.- se accede al panel frontal, 2.- se toman 4 mediciones por cada cuadrante, 3.- si alguna medición es incorrecta se elimina, 4.- al terminar las 16 mediciones se calcula automáticamente el promedio de cada una de ellas y 5.- el valor promedio de las 7 mediciones es enviado hacia la aplicación mostrada en la Figura 42 (parte superior) para su georeferenciación.

La parte inferior de la Figura 41 muestra a detalle el diagrama de bloques de la programación de la aplicación. En la primera sección del diagrama de bloques (Figura 41.1) se realiza una inicialización de variables y se establecen los protocolos de comunicación con los dispositivos seriales y de USB. La segunda sección (Figura 41.2) se encarga de realizar la comunicación con las entradas de voltaje análogo y digitales cuyos valores son leídos de la tarjeta NI USB-6008, los valores leídos son almacenados en 4 variables locales correspondientes a la medición realizada. En la tercera sección (Figura 41.3) se encuentra la rutina de eliminación de rebotes que, utilizando un contador y un comparador a 1, permite únicamente el paso del primer pulso detectado por cualquiera de las entradas digitales, lo que evita que al presionar un botón este se detecte en múltiples ocasiones. La cuarta sección (Figura 41.4) es en donde se realiza la comunicación con el sensor HydraProbell a través del puerto serial; en esta sección, cuando el botón de medir es oprimido, se pide al sensor HydraProbell tomar una medición en el suelo, se espera un tiempo de 1 segundo y se lee la información generada por el sensor, la información se desglosa (pues se lee como líneas de texto) y se almacena en las 3 variables correspondientes. Al terminar la ejecución de la cuarta sección, se da paso a la quinta sección (Figura 41.5); en esta sección se direccionan los valores de las 4 variables que están siendo leídas en la sección 2 junto con los de las 3 variables leídas en la sección 4, los 7 valores son almacenadas en uno de 4 arreglos correspondientes a los 4 cuadrantes del árbol con la posibilidad de ser eliminados en cualquier momento. Al completar la medición de los 4 cuadrantes, la sección 6 (Figura 41.6) realiza el promedio de los valores de cada cuadrante y finalmente los almacena en 4 arreglos (uno por cuadrante) de 7 valores promediados.

La aplicación principal de mediciones del LAICS se muestra en la Figura 42. En el panel frontal se pueden apreciar claramente las 4 secciones que componen esta aplicación: en la parte superior izquierda se tiene la posición geográfica del árbol que se está midiendo; inmediatamente debajo se encuentra la sección “Variables del Aire”, aquí es donde se muestran los valores promedio de las mediciones realizadas en el árbol en turno (en este caso esos valores provienen de la aplicación descrita en la Figura 41); de la misma forma que funcionó con las variables del aire, se obtienen y despliegan las “Variables del Árbol” (parte inferior izquierda del panel frontal) y las “Variables del Suelo” (parte lateral derecha del panel frontal). Una vez que todas las variables han sido medidas para todos los cuadrantes del árbol en cuestión, se les asigna a tales mediciones la posición geográfica leída por la antena GPS y se almacenan en una base de datos que al final de una jornada de trabajo, contendrá la información de todos los árboles medidos en ese tiempo. La base de datos se guarda en un archivo de texto para su posterior análisis con las aplicaciones GIS del LAICS.

En el diagrama de bloques de esta aplicación (parte inferior de la Figura 42) se compone de 8 secciones cuyas funciones son: Sección 1 (Figura 42.1), se encarga de inicializar las variables utilizadas en la aplicación y establecer el protocolo de comunicación con las tarjetas NI-USB6008. Sección 2 (Figura 42.2), aquí se leen las entradas digitales provenientes de las botoneras exteriores construidas para el LAICS y los valores se almacenan en variables locales. Sección 3 (Figura 42.3), esta sección contiene la rutina de eliminación de rebotes para los botones de activación remota del LAICS. Sección 4 (Figura 42.4), se reciben todos los valores promedio de cada cuadrante provenientes de alguna de las aplicaciones de medición y los asigna a una variable local, por ejemplo: los valores provenientes de la aplicación mostrada en la sección anterior; adicionalmente permite eliminar cualquier conjunto de mediciones que por alguna razón esté equivocada. Sección 5 (Figura 42.5), aquí se lleva a cabo de forma completa la comunicación con la antena GPS, esto es: se configura el puerto serial, se lee la información generada por la antena GPS y se separa en secciones útiles (pues se lee como secciones de texto) que son asignadas a variables de latitud, longitud y elevación. Sección 6 (Figura 42.6), en esta sección todos los valores medidos para los cuatro cuadrantes del árbol (asignados en una variable local) junto con la información de latitud longitud y elevación, son organizados en un solo renglón de un arreglo de almacenamiento general; cada renglón que compone ese arreglo de almacenamiento general corresponde a un árbol medido junto con toda la información de sus mediciones. Sección 7 (Figura 42.7), es en donde se borran todos los valores de las variables locales (que actualmente contienen las mediciones del árbol en turno) para dar espacio a la medición de un nuevo árbol. Finalmente la sección 8 (Figura 42.8) envía el arreglo de almacenamiento general hacia un archivo de texto para que pueda ser analizado posteriormente utilizando cualquier tipo de aplicación de mapeo GIS, incluyendo la propia del LAICS.

APENDICE F – Validación de la Calibración de los Sensores y Medidores del LAICS

En el capítulo 4, se presentó en la Tabla 2 la validación de las mediciones realizadas por el LAICS una vez que sus medidores y sensores fueron calibrados. Adicionalmente se presentó evidencia gráfica de la validación del funcionamiento del sensor de PAR LQS-70-10, pero no fueron presentadas las evidencias de la validación de todos los otros instrumentos, sensores y medidores.

A continuación se presenta la evidencia gráfica de que las calibraciones sucedieron como se describe en la tabla mencionada. Se iniciará por presentar la evidencia correspondiente a la aplicación encargada de realizar mediciones sobre las todas las variables del aire y algunas de las del suelo (Figura 23.B.1); posteriormente se validará el funcionamiento del medidor de pH del suelo, cuyas lecturas se obtienen en la aplicación mostrada en la Figura 23.B.3; y, por último, se demostrará que la calibración de los medidores de nutrientes de savia funciona correctamente.

Las mediciones de clorofila realizadas con ayuda de la aplicación mostrada en la Figura 23.B.2 no son validadas pues como ya se explicó, el medidor de clorofila no permite una validación directa de las mediciones, simplemente se autocalibra y muestra las mediciones realizadas. La única validación posible sería al compararse contra los resultados obtenidos por un laboratorio, sin embargo, la comparación de los valores de clorofila medidos por el CCM200 y los valores generados por un análisis de laboratorios, ya ha sido realizada en otros trabajos con excelentes resultados (Biber, 2007).

La medición de CO₂ (Figura 43) del aire se realizó exhalando aire de los pulmones cerca del sensor para elevar el contenido de CO₂ del aire. Las mediciones de la temperatura y humedad relativa del aire (Figura 44) se llevaron a cabo en un ambiente de día normal.

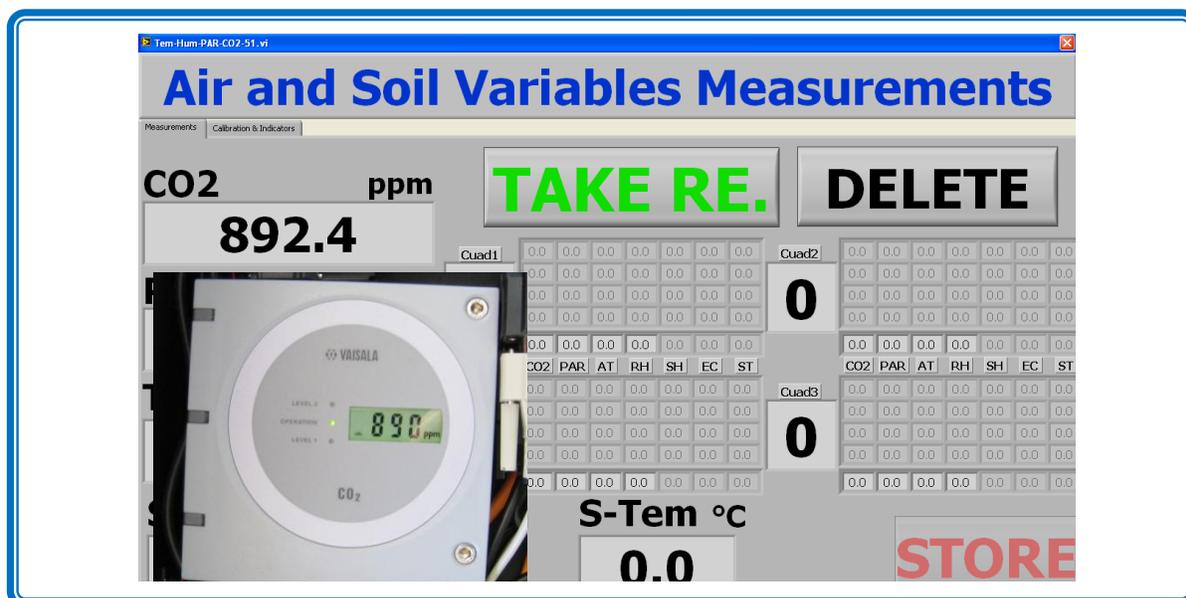


Figura 43 - Validación de las Mediciones Realizadas por el GMT-2222 (Medición de CO₂ en Aire)

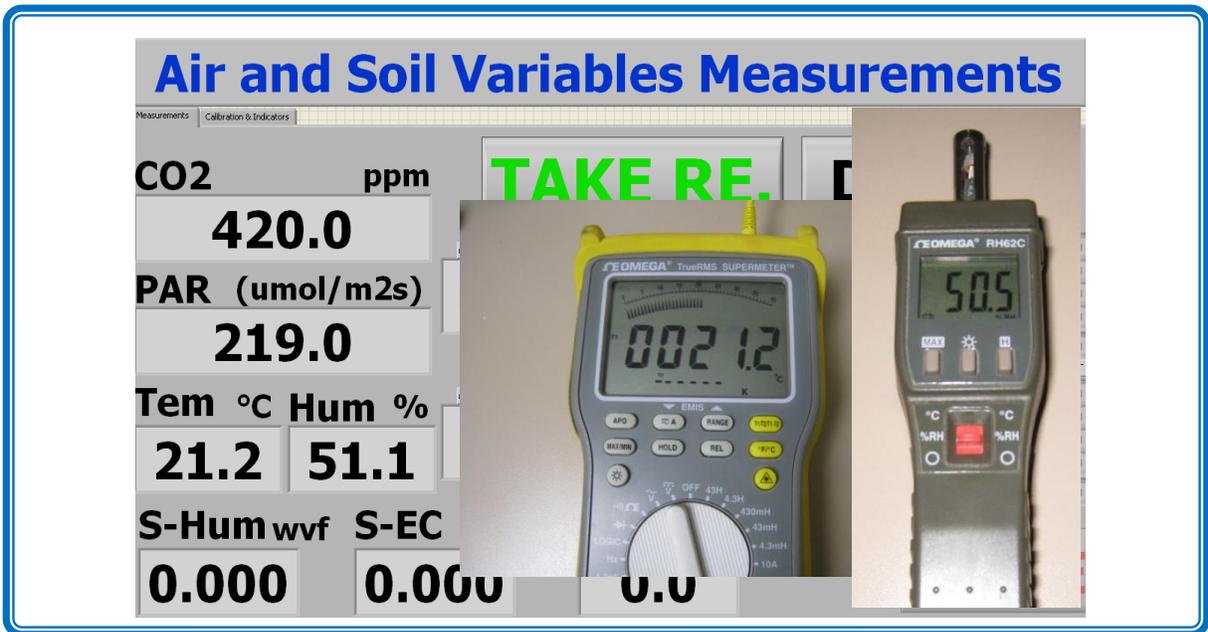


Figura 44 - Validación de las Mediciones Realizadas por el TRH-100-50FT (Medición de Temperatura y Humedad Relativa del Aire)

La validación de la medición de temperatura, conductividad eléctrica y humedad del suelo en realidad consiste de 3 pruebas. En una primera acción se miden los parámetros con el sensor HydraProbe II en el aire, de tal forma que no existirá ni humedad ni conductividad eléctrica, solo la temperatura del aire (Figura 45).

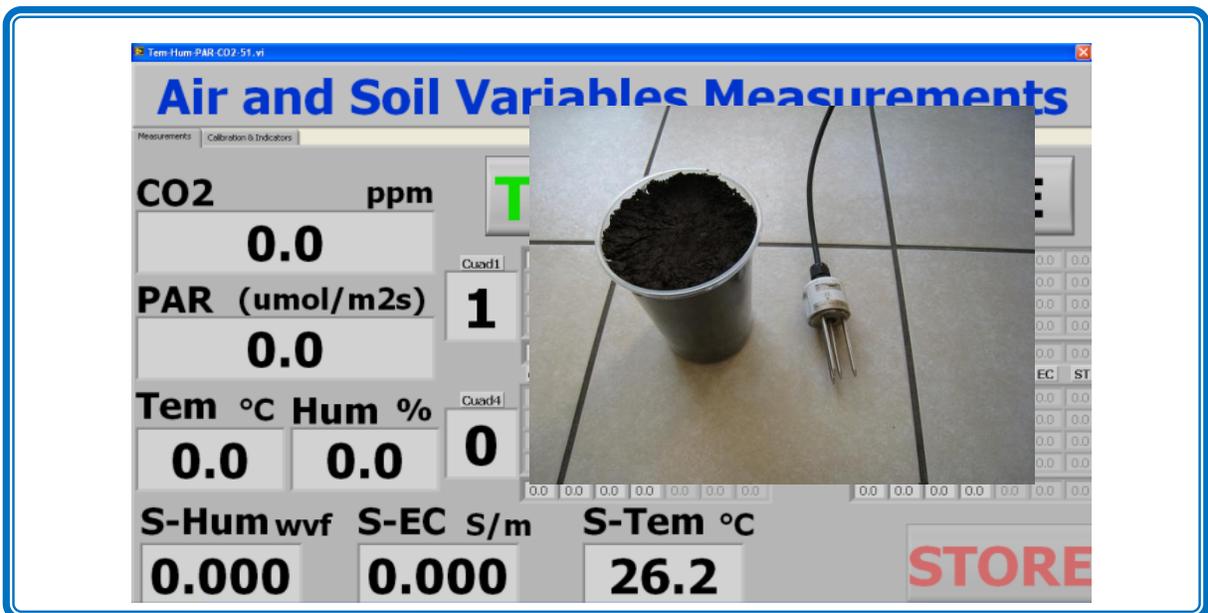


Figura 45 - Validación de las Mediciones Realizadas por el HydraProbe II en Aire (Medición de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo)

Como segunda medición se inserta el sensor en 1Kg de tierra al que se le añadieron 400ml de agua, de esta forma deberá existir una medición de humedad cercana a los 0.400wvf y de conductividad eléctrica diferente de cero, en este caso fue de 0.058S/m (Figura 46).

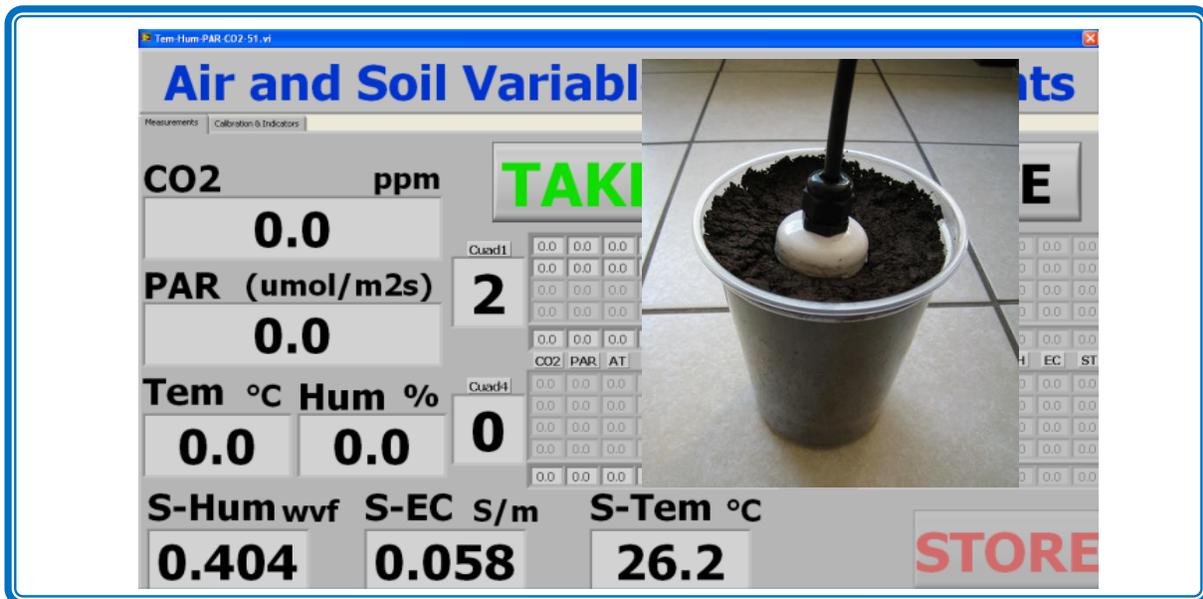


Figura 46 - Validación de las Mediciones Realizadas por el HydraProbe II en Suelo (Medición de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo)

Finalmente, se toma una medición con el sensor completamente sumergido en agua, lo que debe indicar una humedad de 1wvf y, como el agua es la misma que la utilizada para humedecer la tierra, la medición de conductividad eléctrica debe ser muy similar a la obtenida con el sensor en la tierra (Figura 47).

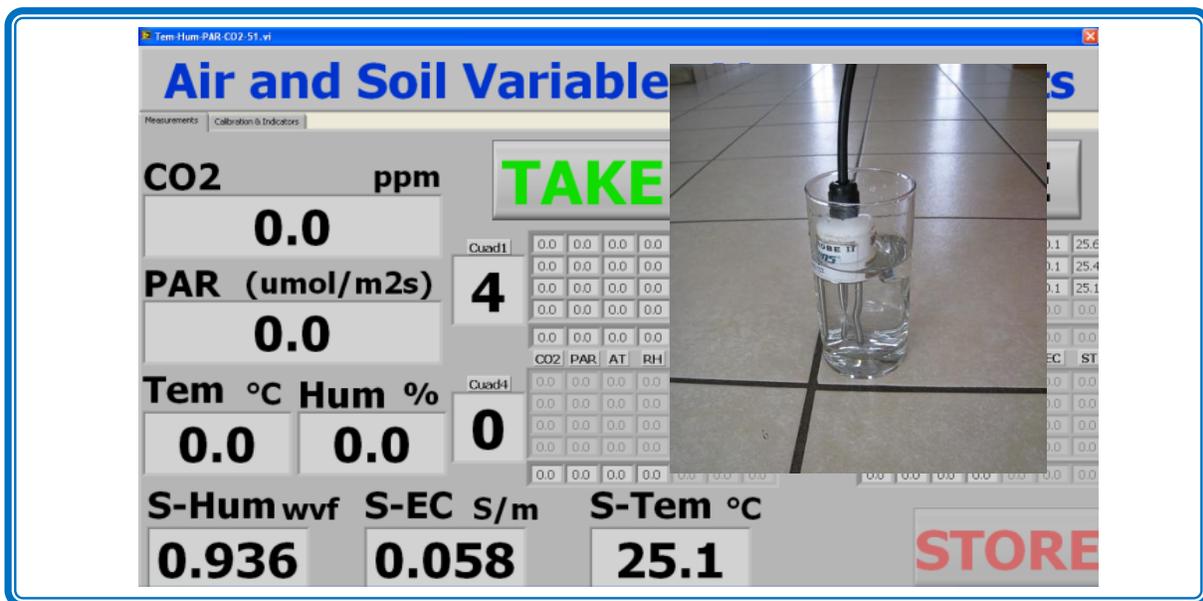


Figura 47 - Validación de las Mediciones Realizadas por el HydraProbe II en Agua (Medición de Humedad, Temperatura y Conductividad Eléctrica del Suelo)

La medición de pH del suelo se realizó en una muestra de suelo de 30g mezclada con 30ml de agua destilada, justo como se procede en las mediciones hechas por el LAICS. La validación de su medición se muestra en la Figura 48.

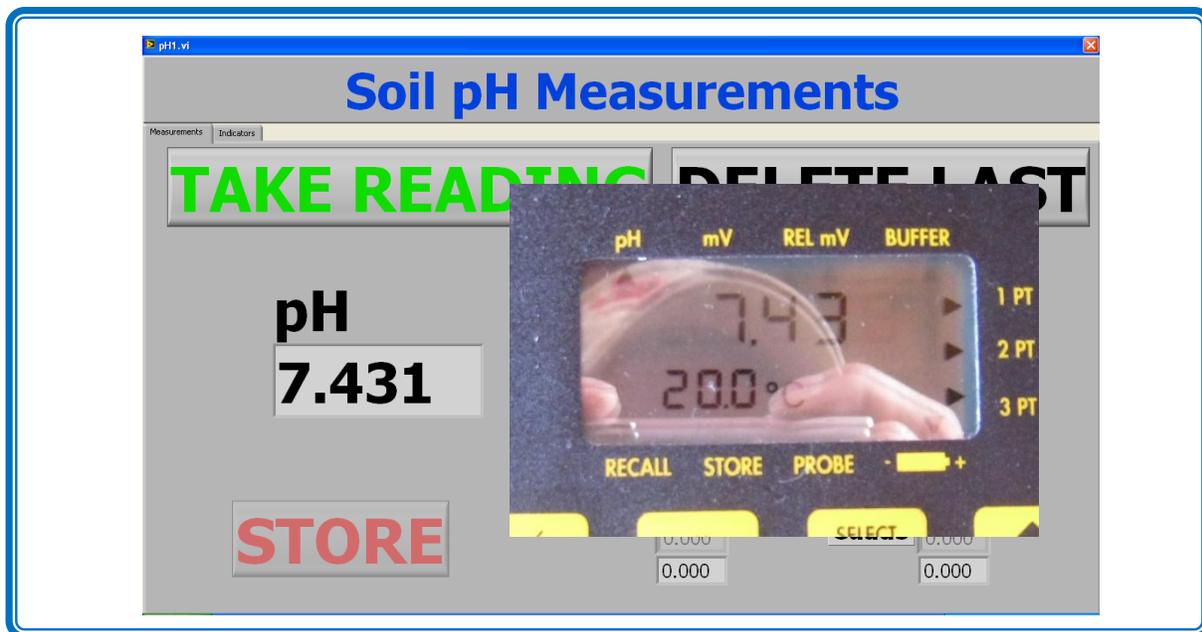


Figura 48 - Validación de las Mediciones Realizadas por el IQ240 (Medición de pH del Suelo)