

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Física



Tesis para optar el Título Profesional de:

Licenciado en Física

Titulada:

Modelamiento y simulación de la fotosíntesis de plantas de papa, basados en el estudio de la radiación solar y los parámetros fisiológicos del cultivo

Presentada por:

Hildo Mac Lean Loayza Loza

Asesor:

Dr. Juan Rodriguez Rodriguez

Lima-Perú

Digitalizado por:

Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse

2012

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a Yola Loza Castillo y Máximo Loayza Sánchez por ser unos padres maravillosos, por formarme y guiar mis primeros pasos, por brindarme su apoyo y amor incondicional.

A mis hermanos Javier Alonso y Gaby Fabiola por todos los momentos que compartimos juntos y a María Chávez por ser mi fuente de inspiración y motivo para seguir adelante.

Agradecimientos

Al Centro Internacional de la Papa y el subprograma de Sistemas de Producción y el Ambiente.

A los Dres. Roberto Quiroz, Adolfo Posadas y Victor Mares por ser mis supervisores y guías.

Al Dr. Juan Rodríguez Rodríguez por ser mi asesor y educador en la Universidad nacional de ingeniería.

Al Ing. Raymundo Gutierrez por ser mi compañero de discusiones.

A los técnicos Luis Silva y Nikolay Alarcon por su amistad y apoyo en la ejecución de mis trabajos.

Índice de contenidos

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 2	5
FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1. RADIACIÓN DEL CUERPO NEGRO	5
2.1.1. TEORÍA CLÁSICA DE LA CAVIDAD RADIANTE.....	6
2.2. ESPECTROMETRÍA	11
2.3. LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA PAR	11
2.4. EL ESPECTRORADIÓMETRO LI-1800	13
2.5. FOTOSÍNTESIS	16
2.5.1. INTRODUCCIÓN	16
2.5.2 CLOROPLASTOS: ESTRUCTURAS Y PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS	17
2.5.3. FASES DE LA FOTOSÍNTESIS.....	19
2.5.3.1. REACCIÓN LUMÍNICA	19
2.5.3.2. REACCIÓN OSCURA O CICLO DE CALVIN-BENSON	21
CAPÍTULO 3.	23
DESARROLLO DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE BIOMASA NETA.....	23
3.1. INTRODUCCIÓN	23
3.2. ESTRUCTURA DEL MODELO DE FOTOSÍNTESIS DEL FOLLAJE	24
3.2.1. PERFIL DE LUZ EN EL ESTRATO SUPERIOR DEL FOLLAJE	24
3.2.2. FOTOSÍNTESIS DE HOJA	25
3.2.3. ACLIMATACIÓN FOTOSINTÉTICA	26
3.2.4. HOJAS EXPUESTAS AL SOL Y SOMBRA.....	27
3.2.5. SEPARACIÓN DE HOJAS EXPUESTAS AL SOL DE LAS HOJAS SOMBREADAS.....	28
3.3. RESPIRACIÓN AUTOTRÓFICA	34
CAPÍTULO 4.	37
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS BIOFÍSICOS QUE FORMAN PARTE DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE TÉCNICAS DE PERCEPCIÓN REMOTA.....	37
4.1. ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES RELATIVAS DE CLOROFILA A EN HOJAS DE PAPA A PARTIR DE ESPECTROS DE REFLECTANCIA DE HOJAS	37
4.1.1. INTRODUCCIÓN	37
4.1.2. OBJETIVO.....	38
4.1.3. MATERIALES	39
4.1.4. METODOLOGÍA.....	39
4.1.5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	39
4.1.6. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....	45
4.2. RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR LAI Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN DIFERENCIAL NORMALIZADO NDVI.....	47
4.2.1. INTRODUCCIÓN	47
4.2.2. MATERIALES.....	48
4.2.3. METODOLOGÍA.....	48
4.2.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	50
4.2.5. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....	51

4.3. CÁLCULO DE LA COMPONENTE DIFUSA DE LA PAR UTILIZANDO LA PAR INCIDENTE Y EL MODELO DE RADIACIÓN DIFUSA GLOBAL DE SPITTERS.....	53
4.3.1. INTRODUCCIÓN	53
4.3.1.1. IRRADIANCIA SOLAR EXTRATERRESTRE SOBRE UNA SUPERFICIE NORMAL	53
4.3.1.2. IRRADIANCIA DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE.....	54
4.3.1.3. PAR EXTRATERRESTRE SEGÚN EL MODELO DE PLANCK	56
4.3.1.4. COMPONENTE DIFUSA DE LA PAR Y EL MODELO DE RADIACIÓN DIFUSA GLOBAL DE SPITTERS.	61
4.3.2. MATERIALES	62
4.3.3. METODOLOGÍA.....	63
4.3.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	64
4.3.5. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....	66
CAPÍTULO 5.	67
VALIDACIÓN DEL MODELO DE BIOMASA NETA EN PLANTAS DE PAPA DE LA VARIEDAD CANCHAN Y APLICACIONES DEL MODELO.	67
5.1. INTRODUCCIÓN	67
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS	68
5.3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	73
5.4. USO EFICIENTE DE LA LUZ (LUE).....	77
5.5. GENERACIÓN DE ESCENARIOS	79
5.6. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXOS	93

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros, unidades, valores y referencias utilizados en los cálculos de respiración de plantas de papa.....	35
Tabla 2. Longitudes de onda que presentaron la mayor correlación con las concentraciones de clorofila A por unidad de área con folíolos de 3 variedades de papa.	45
Tabla 3. Valores de índice de área foliar (LAI (m^2 hoja/ m^2 suelo)) para los primeros 11 muestreos destructivos con sus respectivas 6 repeticiones por muestreo.	49
Tabla 4. Valores de NDVI obtenidos a partir de una cámara Dycam y recopilados de cada uno de los 12 muestreos con 18 repeticiones por muestreo.	50
Tabla 5. Valores promedio de NDVI y LAI.	51
Tabla 6. Ecuaciones de regresión y correlaciones de datos de PAR difusa simulado y observado para un cielo despejado, parcialmente nublado y nublado.	66
Tabla 7. Valores SPAD promedio y valores de absorbancia de luz del extracto de clorofila en 663 y 646 nm respectivamente.	102

Índice de figuras

Figura 1. Cuerpo negro (Eisberg y Resnick 1978).	6
Figura 2. Cavidad con paredes metálicas llena con radiación electromagnética (Eisberg y Resnick 1978).	7
Figura 3. Valores permitidos en una cavidad unidimensional de longitud a (Eisberg y Resnick 1978).	8
Figura 4. Valores permitidos de frecuencia en una cavidad cúbica de lado a (Eisberg y Resnick 1978).	9
Figura 5. Importancia de la PAR en las plantas.	12
Figura 6. Componentes del espectroradiómetro LI-1800(LI-COR, 2001).	13
Figura 7. Flujo radiante incidiendo verticalmente (A) y en un ángulo de 60° (B) (LI-COR, 2001).	14
Figura 8. Esfera integradora LI-1800-12.	16
Figura 9. Cloroplasto (Taiz y Zeiger, 2004).	18
Figura 10. Fase luminosa (Taiz y Zeiger, 2004).	20
Figura 11. Ciclo de Calvin (Taiz y Zeiger, 2004).	22
Figura 12. Fotosíntesis de hoja simulada a partir del modelo HNR.	26
Figura 13. Tasa de fotosíntesis de follaje simulada para la variedad de papa Canchan.	33
Figura 14. Correlación entre la CL_A por cada longitud de onda (T. Endo <i>et al.</i> , 2000).	38
Figura 15. Sensibilidad relativa del ojo $\hat{y}(\lambda)$ a diferentes longitudes de onda (Elaboración propia).	40
Figura 16. Espectro de R_λ (superior) y PDR_λ (inferior) de la variedad SA-2563 por longitud de onda.	41
Figura 17. Espectro de R_λ (superior) y PDR_λ (inferior) de la variedad Pumamaqui por longitud de onda.	41
Figura 18. Espectro de R_λ (superior) y PDR_λ (inferior) de la variedad Purranca por longitud de onda.	42
Figura 19. Correlación entre PDR_λ y el contenido de CL_A/λ por longitud de onda - variedad SA-2563.	42
Figura 20. Regresión lineal entre la PDR_λ y los valores SPAD variedad SA-2563.	43
Figura 21. Correlación entre PDR_λ y el contenido de CL_A/λ por longitud de onda - variedad Puma Maqui.	43
Figura 22. Regresión lineal entre la PDR_λ y los valores SPAD variedad Pumamaqui.	44
Figura 23. Correlación entre PDR_λ y el contenido de CL_A/λ por longitud de onda - variedad Purranca.	44
Figura 24. Regresión lineal entre la PDR_λ y los valores SPAD variedad Purranca.	45
Figura 25. Imagen obtenida por la cámara agrícola Dycam y su respectivo histograma.	48
Figura 26. Medidor de área foliar CID202.	49
Figura 27. Relación entre LAI y NDVI.	51
Figura 28. Irradiancia solar extraterrestre a lo largo de un año juliano - latitud 12° S.	56
Figura 29. I_{0-PAR} VS I_0 del día 200 de un año juliano - latitud 12° S.	60
Figura 30. I_0 VS I_{0-PAR} a lo largo de un año juliano- latitud 12° S.	61
Figura 31. I_{0-PAR} , I_{PAR} e I_{PAR-df} 2/10/07 - latitud $12^\circ 4' 35''$ S.	62
Figura 32. ASD FieldSpec VNIR recopilando datos de irradiancia difusa.	63
Figura 33. Cielo despejado 2-10-07 CIP-LIMA- latitud 12.08° S.	64
Figura 34. Cielo nublado – despejado 4-10-07 CIP-LIMA - latitud 12.08° S.	65
Figura 35. Cielo completamente nublado 17/08/07 CIP-LIMA - latitud 12.08° S.	65
Figura 36. Interior de la cámara de crecimiento experimental.	68

Figura 37. Dinámica de los valores SPAD a lo largo del ensayo.....	70
Figura 38. NDVI de plantas de papa de la variedad Canchán a lo largo del ensayo.....	71
Figura 39. LAI de plantas de papa de la variedad Canchán a lo largo del ensayo.....	71
Figura 40. Estimación del LAI a partir de NDVI.....	72
Figura 41. Simulación de biomasa neta (g materia seca/m ²) - variedad Canchan.....	73
Figura 42. Ajuste lineal e intervalos de confianza de PPN medida y simulada.....	75
Figura 43. Histograma de residuales - Frecuencia vs residuales.....	76
Figura 44. Residuales versus el valor de PPN simulado.....	76
Figura 45. Residuales estandarizados versus el orden de la observación.....	77
Figura 46. Corresponde al LUE obtenido a partir de los datos de campo.....	78
Figura 47. Predicción del LUE a partir de los resultados del modelo.....	79
Figura 48. Simulación de biomasa para valores de P_{max0} entre 7 y 16 KgCO ₂ m ⁻² s ⁻¹	80
Figura 49. Proyección de la biomasa con respecto a dds y P_{max0}	80
Figura 50. Simulación de PPN vs la PAR acumulada y la transmitancia de hoja (m)...	81
Figura 51. Proyección de la PPN sobre el plano de transmitancia y PAR acumulada... 81	81
Figura 52. Simulación de PPN vs. PAR acumulada y LAI.....	82
Figura 53. Proyección de PPN sobre el plano de LAI y PAR acumulada.....	82
Figura 54. Respuesta espectral del espectroradiómetro LI-1800.....	97
Figura 55. Características ópticas del Minolta SPAD-502 (Minolta Co., 2006).....	100
Figura 56. Clorofilómetro Minolta SPAD-502.....	101
Figura 57. Valores SPAD vs concentraciones de clorofila A – variedad Canchán.....	102

Índice de Anexos

Anexo 1. Calibración del espectroradiómetro LI-1800	93
Anexo 2. Estimando concentraciones de clorofila A utilizando el clorofilómetro SPAD-502	99

Glosario

R_T :	Energía total emitida por un cuerpo negro a la temperatura T, por unidad de tiempo y por unidad de área (W/m^2).
LI-1800:	Espectroradiómetro con rango de sensibilidad que abarca desde 350 hasta 850 nm
$\rho_T(\nu)$:	Densidad de energía de un cuerpo negro
PAR:	Radiación fotosintéticamente activa o irradiancia en la región de 400 a 700 nm (W/m^2).
CL_A:	Concentración relativa de clorofila A.
k:	Coefficiente de extinción ($m^2\text{suelo}/m^2\text{hoja}$).
m:	Porcentaje de transmitancia de luz PAR de la hoja ($W/m^2\text{ transmitido}/W/m^2\text{ incidente}$).
LAI:	Índice de área hoja acumulativo ($m^2\text{hoja}/m^2\text{suelo}$)
P_{leaf} :	Fotosíntesis de hoja ($KgCO_2m^{-2}s^{-1}$).
P_{max} :	Fotosíntesis máxima saturada por luz ($KgCO_2m^{-2}s^{-1}$).
R_λ :	Reflectancia de la planta en una longitud de onda λ . ($W/m^2\text{ reflejado}/W/m^2\text{ incidente}$).
PDR_λ :	Primera derivada de la reflectancia de plantas en una longitud de onda λ .
NDVI:	Índice de votación normalizado.
I_{CS} :	Constante solar global extraterrestre (W/m^2).
$I_{PAR-Extra}$:	Constante solar PAR extraterrestre (W/m^2).
SPAD:	Concentraciones relativas de clorofila por unidad de área.
PPG:	Biomasa gruesa o productividad primaria gruesa.
PPN:	Biomasa neta o productividad primaria neta.
LUE:	Uso eficiente de la luz ($g\ C\ MJ^{-1}$).
dds:	Días después de la siembra (<i>días</i>).

Capítulo 1

Introducción

El cultivo de la papa es uno de los más importantes en el Perú y en el mundo debido a que es una fuente de calorías, carbohidratos, glúcidos, vitaminas y proteínas. En el 2009 (según MINAG, 2012) se cultivaron más de 282 mil hectáreas, obteniéndose una producción de 3 millones 762 mil toneladas y rendimientos promedio de 13.3 toneladas por hectárea. La producción del cultivo de la papa en el país es estacional, sembrándose mayormente en la región de la sierra bajo condiciones de secano y en los meses previos al inicio de las lluvias (Octubre-Diciembre).

En años recientes el campo de la teledetección aplicada a la agricultura ha hecho progresos en el desarrollo de métodos que relacionen los datos físicos registrados mediante sensores remotos con un número de parámetros biológicos propios de las comunidades vegetales. A partir del análisis de parámetros físicos tales como la absorbancia y reflectancia de la energía radiante que interactúa con los tejidos vegetales en las plantas, se puede obtener información de variables biológicas tales como la cantidad de hojas de un cultivo o índice de área foliar (LAI), la tasa fotosintética de las hojas, la biomasa o la productividad primaria neta (PPN), las deficiencias nutricionales de nitrógeno en las hojas, el estrés hídrico, la presencia de plagas y enfermedades, etc.

La percepción remota se define en general, como un grupo de técnicas que permiten recolectar información sobre un objeto o área sin necesidad de tener un contacto físico con el objeto o área de estudio. Las distancias que separan al sensor del objeto pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros y los métodos más comunes para recoger información incluyen el uso de sensores colocados sobre aviones o satélites.

La percepción remota implica medir la energía radiante que es reflejada o emitida por los objetos, lo que permite realizar un análisis no destructivo. Para aplicaciones agronómicas en general utilizamos sólo una pequeña región de todo el espectro electromagnético, específicamente la región que corresponde desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR) y en particular la banda PAR (Radiación Fotosintéticamente Activa), que abarca desde 400 hasta 700 nm. Los espectros de reflectancia de una planta caracterizan el material vegetal independientemente de la intensidad o tipo de fuente y están determinados por la fenología o edad del cultivo, la densidad de la cobertura vegetal y por el contenido de pigmentos que presentan las hojas.

La percepción remota ha ganado mucho interés como una herramienta potencial de manejo para la agricultura de precisión. Imágenes de satélites o fotografías aéreas puede permitirle al agricultor observar íntegramente sus cultivos y decidir las zonas que necesitan un manejo específico, así mismo se convierte en una alternativa interesante a los métodos tradicionales de estudio del campo, por la capacidad de cubrir grandes áreas de forma rápida y periódica.

La fotosíntesis que proviene del griego antiguo foto≡ luz y síntesis≡ unión, es un proceso en virtud del cual los organismos con clorofila, como las plantas verdes, las algas y algunas bacterias, capturan energía en forma de luz y la transforman en energía

química, y es seguramente el proceso bioquímico más importante de la biosfera. La clorofila es un pigmento que convierte la energía luminosa en energía química, y entre los diferentes tipos de pigmentos que existen en la naturaleza la más abundante es la clorofila A. El nitrógeno junto con el magnesio forma parte de la molécula de clorofila y por tal razón concentraciones de clorofila A permiten caracterizar el estado nutricional de una planta. Valores altos se relacionan con una planta sana que se puede atribuir a una adecuada disponibilidad de nutrientes en el suelo, mientras que valores bajos pueden significar senescencia, baja disponibilidad de nutrientes en el suelo, o la presencia de algún tipo de estrés.

La energía del sol sustenta a casi todas las formas de vida en la tierra a través de la fotosíntesis. De la radiación global total incidente sobre la superficie vegetal, solo una porción es aprovechable para la realización de la fotosíntesis, la región correspondiente al PAR. Esencialmente toda la luz visible es capaz de promover la fotosíntesis, pero la región del PAR es la más eficiente.

La componente difusa de la radiación PAR incidente, es un parámetro climático poco estudiado pero importante en los modelos que simulan el proceso de fotosíntesis. La importancia de estudiar la componente difusa de la radiación incidente radica en la arquitectura de la planta ya que el dosel, zona superior del follaje, interactúa con la radiación PAR total incidente mientras que el interior del follaje interactúa solo con la componente difusa de la radiación incidente. Generalmente el cálculo de la componente difusa se aborda considerándola como una constante o una fracción de la radiación incidente, lo que resulta en una sobrestimación o subestimación de la interacción luz vs planta.

El índice de área foliar (LAI) o área de la lamina foliar por unidad de área de suelo, es otro de los parámetros influyentes en el proceso de fotosíntesis, porque permite determinar la capacidad de crecimiento de un cultivo. Generalmente el LAI se calcula realizando muestreos destructivos periódicos a lo largo del periodo vegetativo del cultivo, pero se han realizado investigaciones que demuestran que es posible estimar el LAI a partir de técnicas radiométricas no intrusivas basados en la energía que reflejan las plantas resumidos en índices de vegetación como el NDVI (Índice de Vegetación Diferencial Normalizado).

El conocimiento de leyes fundamentales de la física como las ecuaciones de Planck y la distribución espectral de frecuencias de un cuerpo negro, permitieron entender y corregir los valores de irradiancia espectral que brinda el espectroradiómetro LI – 1800. Este aparato se utilizó para medir y validar parámetros fundamentales del modelo de fotosíntesis de follaje como la PAR incidente, la componente difusa de la PAR, el NDVI, la transmitancia de hoja (m), el coeficiente de extinción de luz al interior del follaje (k), etc.

El modelo de la esfera celeste, que describe el movimiento aparente del sol con respecto a la tierra, complementado con las ecuaciones de irradiancia solar extraterrestre sobre una superficie horizontal, que se fundamentan en las relaciones trigonométricas entre la posición del sol en el cielo y las coordenadas ecuatoriales sobre la tierra, y el modelo de radiación difusa global de Spitters *et al.* (1986) permitieron implementar un modelo que explica, en el caso más crítico, el 68% de los datos de la componente difusa de la PAR incidente.

Técnicas radiométricas, basadas en la información obtenida de espectros de reflectancia y transmitancia de hojas recopiladas in situ desde cámaras infrarrojas y espectralradiómetros respectivamente; acompañados por lecturas de espectrofotómetros que midieron la absorbancia de luz, de muestras de hojas diluidas en acetona, en determinadas longitudes de onda permitieron caracterizar el material vegetal correlacionando telemetría no invasiva con concentraciones de pigmentos como la clorofila A.

Finalmente, las técnicas y modelos físicos mencionadas líneas arriba han resultado fundamentales para el desarrollo y validación de los capítulos presentados en esta tesis.

Objetivos

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo que calcule la biomasa acumulada neta de plantas C3 como la papa, a lo largo de todo su periodo vegetativo a partir de un modelo de fotosíntesis de follaje y técnicas no destructivas, basadas en percepción remota, para la cuantificación de gran parte de los parámetros del modelo. El modelo de fotosíntesis utilizado en este estudio es una modificación del trabajo realizado por J. H. M. Thornley 2002. Este modelo está basado en la interacción entre las hojas y la densidad de flujo de fotones y utiliza la ecuación de la hipérbola no rectangular para simular la respuesta de la tasa fotosintética de la hoja ($\text{KgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) a la luz incidente para después integrarla a toda la cobertura vegetal, recopilando una serie de aplicaciones que buscan mejorar las metodologías tradicionales existentes en el campo de la agricultura, a partir del uso de la percepción remota como herramienta para; 1) la detección de enfermedades como por ejemplo el virus de amarillamiento de las venas PVV en cultivos de papa; 2) la cuantificación de contenidos de clorofila A y o nitrógeno en hojas; 3) el cálculo de la componente difusa de la radiación PAR incidente; 4) la obtención del índice de área foliar (LAI) a partir del índice de vegetación normalizado (NDVI), etc. Estas aplicaciones, además, están dirigidas a ser utilizadas como procedimientos alternativos que buscan remplazar técnicas tradicionales disminuyendo costos en horas hombre y análisis de laboratorio.

El modelo permitirá generar diferentes escenarios de la biomasa, simulados bajo diferentes parámetros de entrada tanto fisiológicos como climáticos, lo que puede ayudar a entender las diferentes interacciones en el proceso de fotosíntesis de follaje. Así mismo sirve como herramienta para simular situaciones extremas que pueden ayudar a los investigadores a tomar decisiones sobre posibles acontecimientos ante agentes climáticos extremos.

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1. Radiación del cuerpo negro

Se llama radiación térmica a la radiación emitida por un cuerpo como consecuencia de su temperatura. Todos los cuerpos emiten esta radiación a su alrededor y la absorben de él. Si un cuerpo está más caliente que su alrededor se enfriará ya que la rapidez con que emite energía excederá la rapidez con la que la absorbe de ese contorno. Cuando se alcanza el equilibrio térmico la rapidez de emisión y la de absorción de energía serán iguales (Eisberg y Resnick 1978).

En términos generales, la forma detallada del espectro de radiación térmica emitida por un cuerpo caliente depende de su composición, sin embargo experimentalmente se encuentra que sólo hay una clase de cuerpos que emiten espectros térmicos de características universales. Estos son los llamados cuerpos negros es decir, cuerpos cuyas superficies absorben toda la radiación térmica que incide sobre ellos. El nombre resulta apropiado puesto que dichos cuerpos no reflejan luz, y por tanto se ven negros. Independientemente de su composición, todos los cuerpos negros a la misma temperatura emiten radiación térmica con el mismo espectro (Eisberg y Resnick 1978).

La distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro se especifica por la cantidad $R_T(\nu)$, llamada radiación espectral, definida tal que $R_T(\nu)d\nu$ es igual a la energía emitida en forma de radiación con frecuencias en el intervalo entre ν y $\nu + d\nu$ de un área unitaria de la superficie a la temperatura absoluta T y por unidad de tiempo.

La integral de la radiancia espectral $R_T(\nu)$ sobre toda ν , es la energía total emitida de un cuerpo negro a temperatura T, por unidad de tiempo y por unidad de área y se define como R_T , el resultado se conoce como la ley de Stefan y fue enunciada por primera vez en 1879, como:

$$R_T = \sigma T^4 \quad (2.1 - 1)$$

Donde:

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 - \text{ }^\circ\text{K}^4, \text{ es llamada la ecuación de Stefan-Boltzmann.}$$

Un ejemplo de cuerpo negro consiste de un objeto que contiene una cavidad y que se comunica con el exterior por medio de un pequeño agujero como se muestra en la Figura 1. La radiación del exterior que incida sobre el agujero, penetra en la cavidad y se refleja hacia todos sentidos en las paredes de la cavidad, de modo que eventualmente se absorben en estas paredes. Si el área del agujero es muy pequeña, comparada con el área de la superficie interna de la cavidad, la radiación reflejada hacia el exterior a través del agujero será despreciable. Esencialmente toda la radiación que incide sobre el agujero será absorbida, por lo tanto, el agujero tendrá todas las propiedades de la superficie de un cuerpo negro (Eisberg y Resnick 1978).

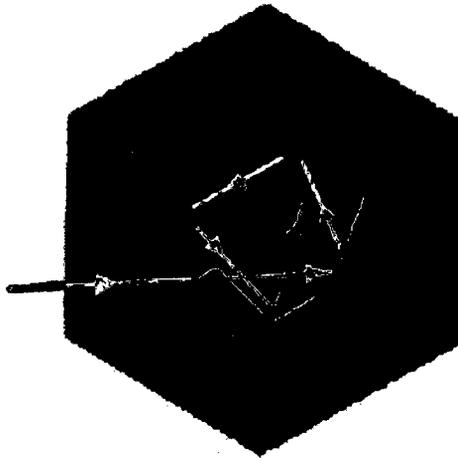


Figura 1. Cuerpo negro (Eisberg y Resnick 1978).

Supóngase que las paredes de la cavidad se calientan a una temperatura T , de modo que emitirá radiación térmica que llenara la cavidad. Una pequeña fracción de esta radiación, que incida en el agujero, pasara por él, y así el agujero actuara como emisor de radiación térmica. Como el agujero debe tener las propiedades de la superficie de un cuerpo negro, la radiación que emite debe tener el espectro de un cuerpo negro; sin embargo, como el agujero muestrea la radiación térmica dentro de la cavidad, resulta evidente que la radiación en la cavidad también debe tener un espectro de cuerpo negro. De hecho, debe tener un espectro de cuerpo negro característico a la temperatura T de las paredes, ya que esta es la única temperatura que se define en el sistema.

El espectro emitido por el agujero en la cavidad, se especifica en términos del flujo de energía $R_T(\nu)$, sin embargo resulta mucho más útil especificar el espectro de la radiación dentro de la cavidad en términos de una densidad de energía $\rho_T(\nu)$, que se define como la energía contenida en una unidad de volumen de la cavidad a la temperatura T , en el intervalo de frecuencias entre ν y $\nu + d\nu$. Es evidente que estas unidades deben ser proporcionales entre sí, es decir:

$$\rho_T(\nu) \propto R_T(\nu) \quad \dots (2.1 - 2)$$

Por lo tanto, la radiación dentro de una cavidad cuyas paredes están a temperatura T , tiene el mismo carácter que la radiación emitida por la superficie de un cuerpo negro a temperatura T . Experimentalmente, resulta conveniente producir un espectro de cuerpo negro, por medio de una cavidad en un cuerpo caliente, con un agujero hacia el exterior, y teóricamente también es conveniente estudiar la radiación de un cuerpo negro, analizando la radiación de una cavidad, ya que es posible aplicar argumentos muy generales para predecir las propiedades de la radiación de una cavidad.

2.1.1. Teoría clásica de la cavidad radiante

Considérese que a una cavidad con paredes metálicas se la calienta uniformemente a una temperatura T . Las paredes emiten radiación electromagnética en el intervalo térmico de frecuencias. Se sabe que esto ocurre por el movimiento acelerado de los electrones en las paredes, que resulta de la agitación térmica. Por simplicidad se supone que las paredes metálicas llenas con radiación electromagnética tiene la forma de un

cubo de lado a , como se muestra en la Figura 2, en ese caso la radiación que se refleja de las paredes puede ser analizada en términos de tres componentes a lo largo de las tres direcciones mutuamente perpendiculares que definen los lados de la cavidad (Eisberg y Resnick 1978).

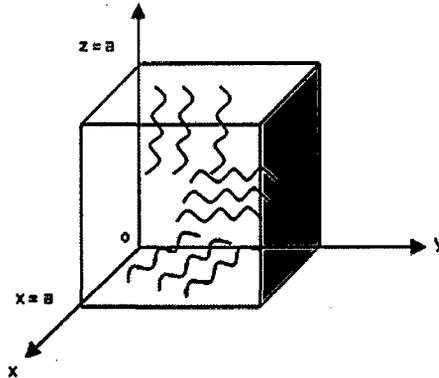


Figura 2. Cavidad con paredes metálicas llena con radiación electromagnética (Eisberg y Resnick 1978).

Como las paredes opuestas son paralelas entre sí, las tres componentes de la radiación no se mezclan y se pueden tratar por separado. Considérese la componente x en la pared metálica en $x = 0$. Toda la radiación que incide sobre esta pared es reflejada y las ondas incidentes y reflejadas se combinan para formar una onda estacionaria. Ahora bien, como la radiación electromagnética es una vibración transversal con el vector de campo eléctrico E perpendicular a la dirección de propagación, y como la dirección de propagación para este componente es perpendicular a la pared es cuestión, el vector campo eléctrico E es paralelo a la pared. Sin embargo, una pared metálica no es compatible con un campo eléctrico paralelo a su superficie, ya que siempre se puede establecer un flujo de cargas de modo tal que se neutralice el campo. Por lo tanto para esta componente E siempre es cero en la pared. Es decir la onda estacionaria con la componente x de la radiación, debe tener un nodo en $x = a$, ya que no puede haber un campo eléctrico paralelo en la pared correspondiente. Además se aplican condiciones similares a las otras dos componentes; la onda estacionaria asociada a la componente y debería tener nodos en $y = 0$ e $y = a$, y la onda estacionaria asociada con la componente z , debería tener nodos en $z = 0$ y $z = a$. Estas condiciones imponen limitaciones en las longitudes de onda posibles y por lo tanto, en las frecuencias posibles de la radiación electromagnética en la cavidad (Eisberg y Resnick 1978).

Ahora se considerará el problema de contar el número de ondas estacionarias con nodos en las superficies de la cavidad, cuyas longitudes de onda se encuentran en el intervalo entre λ y $\lambda + d\lambda$, correspondiente al intervalo de frecuencias entre ν y $\nu + d\nu$.

El campo eléctrico para una onda estacionaria unidimensional puede escribirse matemáticamente por la función:

$$E(x, t) = E_0 \text{sen}(2\pi x/\lambda) \text{sen}(2\pi \nu t) \quad \dots (2.1 - 3)$$

Donde λ es la longitud de onda, ν la frecuencia y E_0 la amplitud máxima de la onda.

Las dos primeras cantidades se relacionan entre sí por medio de la ecuación.

$$v = c/\lambda \quad \dots (2.1 - 4)$$

Donde c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas. De la ecuación (2.1 - 3), es obvio que la amplitud será cero en todo tiempo para posiciones que satisfagan la relación

$$2x/\lambda = 0,1,2,3, \dots \quad \dots (2.1 - 5)$$

La onda tendrá nodos fijos en ellas, esto es, una onda estacionaria. Para poder satisfacer el requisito de que las ondas tengan nodos en los extremos de la cavidad unilateralmente se escoge el origen del eje x en uno de los extremos de la cavidad ($x = 0$) y se exige que en el otro extremo ($x = a$)

$$2x/\lambda = n \quad \text{para} \quad x = a \quad \dots (2.1 - 6)$$

Donde:

$$n = 1,2,3,4, \dots$$

Para estos valores permitidos, las amplitudes de las ondas estacionarias siguen un patrón parecido a las vibraciones de una cuerda sujeta a sus extremos. En nuestro caso, el patrón representa ondas electromagnéticas estacionarias.

Por conveniencia, la discusión se continúa en términos de las frecuencias permitidas en lugar de longitudes de onda permitidas. Estas frecuencias son $v = c/\lambda$, donde $2a/\lambda = n$. Es decir:

$$v = cn/2a = 1,2,3,4, \dots \quad \dots (2.1 - 7)$$

Estas relaciones se muestran en la Figura 3, valores de frecuencia permitidos en una cavidad unidimensional de longitud a . Dicho diagrama resulta útil en el cálculo del número de valores permitidos de frecuencia v en el intervalo de v a $v + dv$, que se denota por $N(v)dv$. Para evaluar esta cantidad se cuenta el número de puntos sobre el eje n que se encuentra entre dos límites que se construyen de manera tal que correspondan a las frecuencias v a $v + dv$, respectivamente, como los puntos se distribuyen uniformemente en el eje n , aparentemente el número de puntos comprendidos entre estos dos límites será proporcional a dv pero no dependerá de v .

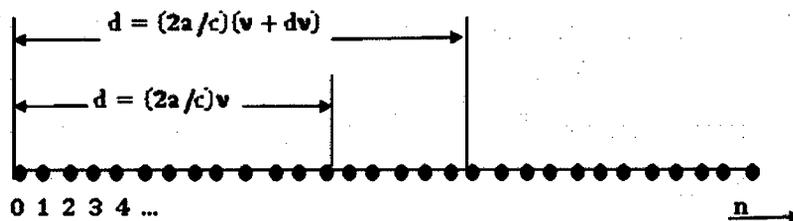


Figura 3. Valores permitidos en una cavidad unidimensional de longitud a (Eisberg y Resnick 1978).

Se puede apreciar fácilmente que $N(v)dv = (2a/c)dv$, sin embargo debe multiplicarse por dos ya que para cada frecuencia permitida, existe en realidad dos ondas

independientes a los dos estados de polarización posibles de las ondas electromagnéticas. Por lo tanto se tiene que:

$$N(\nu)d\nu = \frac{4a}{c} d\nu \quad \dots (2.1 - 8)$$

Para el caso de una cavidad tridimensional, el conjunto de puntos uniformemente distribuidos en valores enteros a lo largo del eje n , se sustituye por un arreglo tridimensional uniforme de puntos cuyas tres coordenadas corresponden a valores enteros a lo largo de los tres ejes n mutuamente perpendiculares. Cada punto del arreglo corresponde a una onda estacionaria tridimensional particular permitida. El número de nodos de las componentes x, y, z de la onda estacionaria, se obtienen de los valores enteros n_x, n_y , y n_z , equivale a analizar una onda tridimensional (es decir que se propaga en una dirección arbitraria) en tres componentes tridimensionales. En este caso, el número de frecuencias permitidas es el intervalo de frecuencia de ν a $\nu + d\nu$ es igual al número de puntos contenidos entre dos cascarones esféricos con radios correspondientes a la frecuencias a ν y $\nu + d\nu$ respectivamente (ver Figura 4).

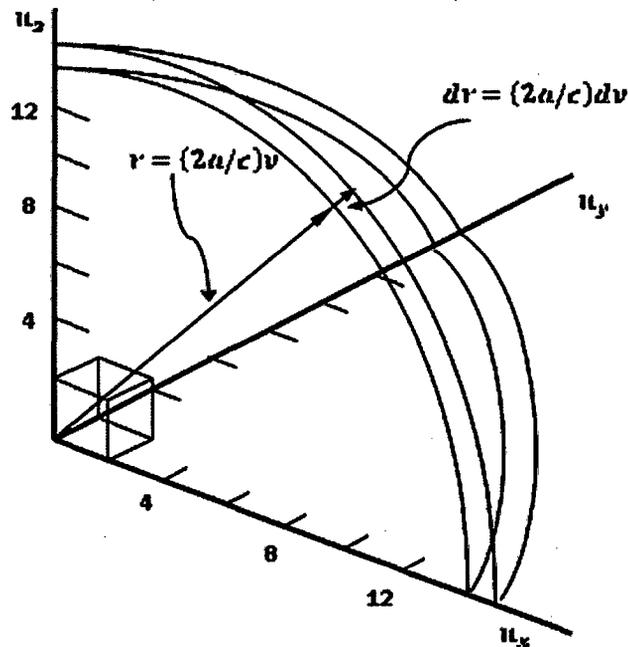


Figura 4. Valores permitidos de frecuencia en una cavidad cúbica de lado a (Eisberg y Resnick 1978).

Lo anterior será proporcional al volumen entre estos dos cascarones esféricos, ya que los puntos se distribuyen uniformemente. Por lo tanto, se puede ver que $N(\nu)d\nu$ será proporcional a $\nu^2 d\nu$, ya que el factor ν^2 es proporcional al área de los cascarones y el segundo factor $d\nu$, es proporcional a la distancia entre ellos y se encuentra que:

$$N(\nu)d\nu = \frac{8\pi V}{c^3} \nu^2 d\nu \quad \dots (2.1 - 9)$$

La energía por unidad de volumen en el intervalo de frecuencias entre ν y $\nu + d\nu$ del espectro de cuerpo negro de una cavidad a temperatura T , es simplemente el producto

de la energía promedio de cada onda estacionaria, por el número de ondas estacionarias en el intervalo de frecuencias dividido entre el volumen de la cavidad.

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} d\nu \quad \dots (2.1 - 10)$$

Esta es la fórmula de Rayleigh-Jeans, para la radiación del cuerpo negro. En el límite de frecuencias bajas, el espectro clásico se aproxima a los resultados experimentales, pero, a medida que la frecuencia crece, la predicción teórica tiende a infinito. Los experimentos demuestran que la densidad de energía siempre permanece finita, como obviamente debe ser, y de hecho la densidad de energía tiende a cero para frecuencias muy altas. Este comportamiento tan irreal de la teoría clásica a altas frecuencias es conocida como la catástrofe ultravioleta.

Tratando de resolver la discrepancia entre teoría y experimento, Planck descubrió que podía obtener $\bar{\epsilon} \approx kT$ cuando la diferencia entre energías adyacentes, $\Delta\epsilon$, es pequeña y $\bar{\epsilon} \approx 0$, cuando $\Delta\epsilon$ es grande. Como requería el primer resultado para valores pequeños de ν , y el segundo resultado para valores grandes de ν , obviamente era necesario que $\Delta\epsilon$ fuese una función creciente de ν . Por trabajo numérico, encontró que podía tomar la relación más simple posible entre $\Delta\epsilon$ y ν , que tuviera esta propiedad. Es decir, supuso que estas cantidades eran proporcionales

$$\Delta\epsilon \propto \nu$$

Escrita como una ecuación en lugar de una proporcionalidad, se tiene que:

$$\Delta\epsilon = h\nu$$

Donde h es la constante de Planck y tiene el valor de:

$$h = 6.63 * 10^{-34} \text{Joule} - \text{seg}$$

Sabiendo que la energía promedio $\bar{\epsilon}$ se define como:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon P(\epsilon) d\epsilon}{\int_0^{\infty} P(\epsilon) d\epsilon}$$

La fórmula que obtuvo Planck para $\bar{\epsilon}$ es:

$$\bar{\epsilon}(\nu) = \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad \dots (2.1 - 11)$$

Por lo tanto, la fórmula que se obtiene para la densidad de energía en el espectro del cuerpo negro, utilizando el resultado de $\bar{\epsilon}(\nu)$ en lugar del valor clásico $\epsilon = kT$, es:

$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad \dots (2.1 - 12)$$

Esta es la ecuación del espectro del cuerpo negro de Planck (Eisberg y Resnick 1978).

2.2. Espectrometría

La espectrometría estudia la medida y análisis de flujos emitidos por una fuente radiante o incidente sobre una superficie, en diferentes longitudes de onda. Este flujo puede ser influenciado por reflexión, transmisión, fluorescencia, o dispersión de medios intermediarios.

Las unidades usadas en espectrometría son:

$Watt\ m^{-2}[nm^{-1}]$	Irradiancia espectral
$Watt\ ster^{-1}m^{-2}[nm^{-1}]$	Radiancia espectral
$Watt\ ster^{-1}[nm^{-1}]$	Intensidad espectral

La tasa a la cual la radiación es recibida por una superficie por unidad de área se denomina irradiancia, la misma que se expresa en unidades de potencia por unidad de área (W/m^2).

La cantidad de radiación recibida por una superficie por unidad de área durante un determinado período de tiempo se denomina irradiación y se expresa en unidades de energía por unidad de área (MJ/m^2).

La energía solar se mide utilizando solarímetros. Los solarímetros están basados en el principio de absorción de la radiación solar por un cuerpo negro y en la conversión de esta radiación a otra forma de energía, la misma que es proporcional a la intensidad de la radiación.

Teóricamente, un cuerpo negro capta toda la radiación a la que está expuesta. Sin embargo, en la práctica sólo se cuentan con cuerpos opacos los cuales solamente son capaces de captar una parte de la radiación total. No obstante, a partir de consideraciones termodinámicas es posible emplear estos cuerpos opacos para estimar la radiación solar instantánea sobre una región determinada. De otra parte, la energía aprovechable de la radiación solar proviene de la región del espectro visible e infrarrojo cercano, que son las ondas electromagnéticas que producen el incremento de la energía interna del cuerpo.

Para medir irradiancia espectral, o irradiancia por unidad de longitud de onda, se requiere de un arreglo óptico que disperse la luz y fotosensores, que midan la intensidad de luz en sus diferentes frecuencias, como los que utiliza un espectroradiómetro.

2.3. La Radiación fotosintéticamente activa PAR

La radiación fotosintéticamente activa o PAR en sus siglas en inglés, se refiere al flujo utilizado por las plantas para la fotosíntesis (Decoteau, D.R.).

La radiación fotosintéticamente activa se mide utilizando un sensor cuántico. Un sensor cuántico ideal posee una respuesta cuántica uniforme en la región de longitudes de onda desde 400 a 700 nm. La salida del sensor cuántico es la integración del flujo espectral incidente sobre el sensor, es decir:

$$\text{Salida del sensor cuantico} = \int_{400}^{700} E(\lambda)r(\lambda)d\lambda$$

Donde:

$E(\lambda)$: el flujo incidente espectral sobre el sensor cuantico

$r(\lambda)$: la respuesta cuantica

$d\lambda$: diferencial de longitudes de onda

Las unidades típicas para la salida de un sensor cuántico incluyen:

1. *fotones $s^{-1}m^{-2}$ (Densidad de flujo de fotones)*
2. *micromoles $s^{-1}m^{-2}$ (Densidad de flujo de fotones)*
3. *microestein $s^{-1}m^{-2}$ (Densidad de flujo de fotones)*

Donde:

$$1 \text{ Einstein} = 6.02 * 10^{23} \text{ fotones} = 1 \text{ mol de fotones} = 6.02 * 10^{23} \text{ cuantos}$$

Un foliolo representa, cada una de las hojas o láminas más pequeñas que conforman cualquier hoja compuesta. Para entender la importancia de la PAR en las plantas observemos la Figura 5. En ella se aprecia, el espectro de reflectancia (R) y el espectro invertido de transmitancia (T) de foliolos correspondiente a plantas de papa de la variedad Canchan, que fueron obtenidos en el 2010 utilizando un espectroradiómetro LI-1800 (LI-COR Inc., Lincoln, NE USA) y su accesorio: la esfera integradora (LI-1800-12), como parte del presente trabajo de tesis (LI-COR. 2001). El área correspondiente a la región entre los espectros de reflectancia y transmitancia invertido en la región de 400 a 700 nm representa la cantidad de energía que absorbe la hoja y constituye más del 85% de la energía incidente y no existe otra región en el espectro electromagnético incidente que sea absorbido con mayor eficiencia que la banda PAR por las plantas. Esta es la razón de porque hoy en día los modelos de fotosíntesis consideran la región PAR, dejando de lado la radiación global incidente (0- 2500 nm), como la región de mayor importancia del espectro electromagnético incidente.

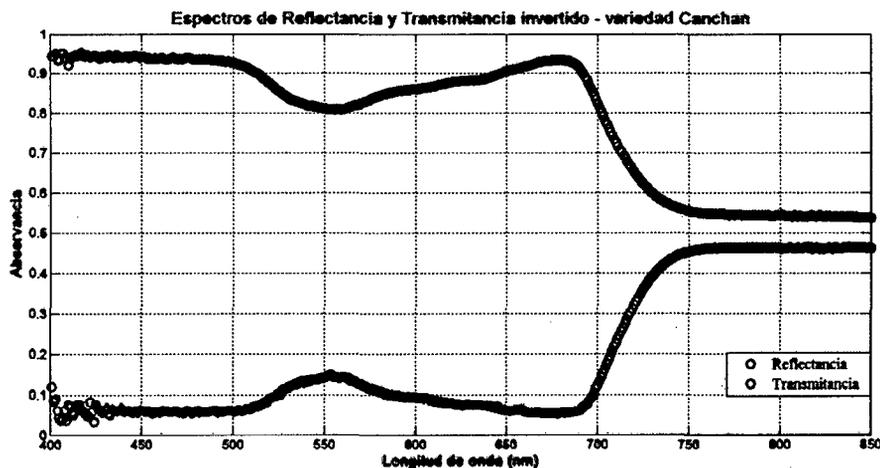


Figura 5. Importancia de la PAR en las plantas.

2.4. El espectroradiómetro LI-1800

Un espectroradiómetro es un instrumento diseñado para medir la distribución espectral de potencia de dispositivos ópticos, con el objetivo de estudiar y clasificar sistemas y dispositivos con sus propiedades ópticas. El espectroradiómetro portátil Licor LI – 1800, cuyo rango de sensibilidad abarca desde 350 hasta 850 nm con un paso de 2 nm, es capaz de medir la radiación luminosa de fuentes artificiales y naturales de forma rápida y eficiente (LI-COR, 2001).

El Licor LI – 1800 es un instrumento completamente autónomo y resultado fundamental para desarrollar este trabajo de tesis. El LI – 1800 permitió medir parámetros climáticos como la PAR incidente, parámetro íntimamente relacionado con la fotosíntesis, y de su habilidad de medir luz en regiones específicas del espectro electromagnético incidente, permitió calcular parámetros biofísicos fundamentales para la implementación del modelo de fotosíntesis de follaje.

Los datos espectrales adquiridos por el LI – 1800 permiten cuantificar y caracterizar diferentes tipos de fuente de luz, y entre sus principales componentes tenemos (ver Figura 6):

- Receptor coseno
- Rueda de filtros
- Monocromador
- Detector de silicio

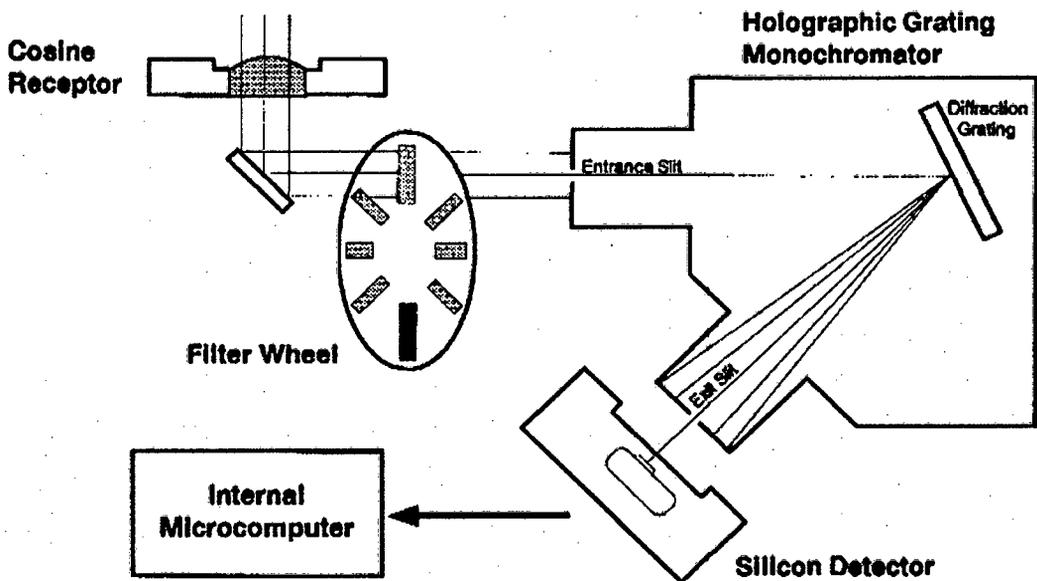


Figura 6. Componentes del espectroradiómetro LI-1800(LI-COR, 2001).

Receptor coseno:

El receptor coseno estándar es un domo transparente de politetrafluoretileno (PTFE) el cual capta el flujo radiante de acuerdo al coseno del ángulo incidente (según la ley de coseno de Lambert) y colecciona radiación desde todos los ángulos de un hemisferio permitiendo al espectroradiómetro medir densidades de flujo por unidad de área (m^2). Un espectroradiómetro que carezca de una corrección coseno apropiado puede presentar errores significativos bajo diferentes condiciones de radiación difusa lo cual ocurre por ejemplo; 1) cuando se realizan medidas de irradiancia bajo el estrato superior del follaje de una planta o; 2) cuando se realizan medidas de irradiancia en campo abierto con pequeños ángulos de elevación solar (LI-COR, 2001).

En resumen, un receptor con una respuesta coseno, proporciona medidas de densidades de flujo a través de una superficie plana. Esto permite al sensor medir densidades de flujo por unidad de área.

La relación coseno puede ser explicada en términos de flujo radiante incidiendo sobre una superficie plana. La ley de cosenos de Lambert es explicada ilustrando líneas de flujo radiante sobre una superficie normal a la fuente (ver Figura 7 superficie A) y en un ángulo de 60° respecto a la normal (ver Figura 7 superficie B). La figura A muestra 6 líneas incidiendo verticalmente sobre una unidad de área. Ahora si esas mismas 6 líneas incidieran con un ángulo de 60° , sobre la misma superficie, sería equivalente a que solo 3 líneas inciden sobre la misma unidad de área, como se aprecia en la figura B. Esto es ilustrado matemáticamente como:

$$S = (I)\cos(60) \text{ por unidad de área}$$
$$S = (6)(0.5) \text{ por unidad de área}$$

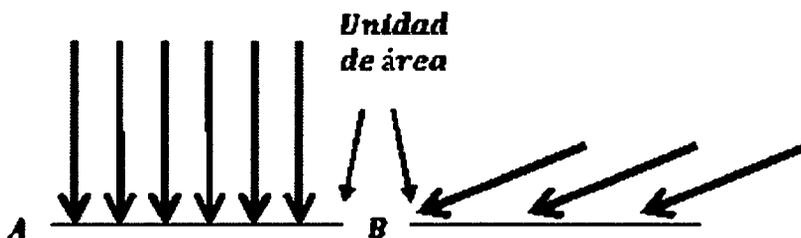


Figura 7. Flujo radiante incidiendo verticalmente (A) y en un ángulo de 60° (B) (LI-COR, 2001).

Rueda de filtros:

El sistema óptico del LI – 1800 posee 3 principales componentes; la rueda de filtros, el monocromador holográfico de ranura y un detector de silicio. La energía radiante captada por el espectroradiómetro debe primero pasar a través de una rueda de filtros antes de ingresar al monocromador. El LI – 1800 solo puede medir una región del espectro incidente a la vez; la luz en otras longitudes de onda no es aun deseada, puesto que induciría a errores si llegara al detector. La rueda de filtros sirve para filtrar aquellas longitudes de onda que no están en la misma región del espectro de la que se está midiendo. La rueda de filtros consiste de 7 filtros los cuales eliminan los armónicos de segundo orden; durante cada evaluación un microcomputador interno rota

automáticamente la rueda de filtros para seleccionar los filtros apropiados para la región espectral que está siendo escaneada (LI-COR, 2001). La posición secuencial de los filtros corresponde a los siguientes intervalos de longitudes de onda:

299-348; 349-418; 559-678; 679-775 y 776-850.

La rueda de filtros también posee una referencia oscura. Cuando la rueda está en esta posición, no hay luz alcanzando el detector y cualquier salida por el detector es considerada como un nivel cero. La lectura del negro es realizada antes y después de cada barrido. La causa más probable de diferentes lecturas oscuras es una diferencia de temperatura del detector antes y después del barrido.

Monocromador:

El monocromador dispersa la radiación policromática transmitida a través de la rueda de filtros en bandas de onda estrecha que pasan una a una al detector. Los componentes esenciales del monocromador son la ranura de entrada, la rejilla de difracción y la ranura de salida (LI-COR, 2001).

La ranura de entrada es una apertura rectangular a través de la cual debe pasar la radiación para ingresar al monocromador.

La rejilla de difracción es el componente que realmente dispersa las longitudes de onda en el monocromador. Cuando la radiación desde la ranura de entrada golpea la rejilla, ésta es difractada hacia la ranura de salida. El resultado neto de esta difracción es que diferentes longitudes de onda son proyectadas en ángulos ligeramente diferentes hacia la ranura de salida.

El propósito de la ranura de salida es restringir y definir el ancho de banda de la radiación que alcance al detector. Desde que la radiación dirigida en la ranura de salida ha sido espectralmente dispersada por la rejilla, el ancho de la ranura de salida determina directamente el ancho espectral de las longitudes de onda que alcanzan al detector.

Detector:

Luego que la luz emerge del monocromador, la energía radiante incide sobre el detector produciendo una corriente proporcional a la cantidad de radiación. Esta corriente es amplificada, convertida en voltaje y pasa a través de un convertidor analógico digital para finalmente estar a disposición del microcomputador interno del LI – 1800.

El detector en el LI – 1800 es un fotodiodo de silicio. El silicio posee excelentes propiedades como por ejemplo: mecánicamente robusto, no quebradizo, y excelente estabilidad con la temperatura a largo tiempo. La estabilidad con la temperatura del silicio es ideal entre 400 y 950 nm. Por encima de estas longitudes de onda la estabilidad con la temperatura del silicio se degenera marcadamente (LI-COR, 2001).

La dependencia con la temperatura del detector de silicio es:

- 0.1% / °C a 350 nm
- 0.05% / °C desde 400 – 950 nm
- 0.5% / °C a 1000 nm
- 1 – 2% / °C a 1100 nm

El Espectroradiómetro LI-1800 no solo se utilizó para obtener datos de irradiancia solar, sino que también permitió obtener datos de reflectancia y transmitancia de hojas utilizando el accesorio de percepción remota activa conocido como esfera integradora (LI-1800-12) que se aprecia en la Figura 8. La esfera integradora es un accesorio complementario del LI-1800 y se utilizó para estudiar la interacción entre la luz y los folíolos de papa en condiciones controladas. Los folíolos eran irradiados por una fuente de luz artificial de halógeno-tungsteno, que simula el espectro solar incidente, al interior de una cámara completamente recubierta de sulfato de bario, altamente reflectante en la región visible del espectro electromagnético incidente, y que permitía obtener espectros en condiciones ideales (LI-COR, 2001).



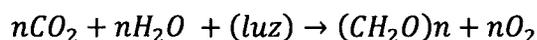
Figura 8. Esfera integradora LI-1800-12.

Debido a la importancia del LI – 1800 en el presente trabajo de tesis, se estudió y se propuso un protocolo de calibración del equipo, realizándose diferentes ensayos en las instalaciones del CIP de las localidades de Huancayo y San Ramón, ubicados a alturas de 3250 y 750 metros sobre el nivel del mar respectivamente, y cuyo procedimiento se puede apreciar en el Anexo 1.

2.5. Fotosíntesis

2.5.1. Introducción

La fotosíntesis es el proceso central de los modelos de simulación que estiman el crecimiento y productividad de todas las plantas (Keulen *et al.* 1982, Ritchie 1995). Es un proceso que involucra la fijación de CO₂ vía un conjunto de reacciones iniciadas por la habilidad de las plantas de captar y utilizar energía lumínica. La ecuación estequiométrica para la fotosíntesis es:



Este proceso es vital para el crecimiento de todas las plantas durante su ciclo de desarrollo. En esencia, la fotosíntesis es el único mecanismo de entrada de energía en la biosfera. Las únicas excepciones se presentan en bacterias quimiosintéticas, que obtienen energía oxidando sustratos inorgánicos como iones ferrosos y azufre disueltos de la corteza terrestre o al oxidar H₂S que se libera de la actividad volcánica.

El proceso global de la fotosíntesis es una oxidación del agua (eliminación de electrones con liberación de O_2 como subproducto) y una reducción de CO_2 para formar compuestos orgánicos tales como carbohidratos. El proceso oxidativo de la respiración, similar y también controlado con eficiencia, mantiene vivo a todos los organismos. Durante los procesos de combustión y respiración se extraen electrones de los compuestos carbonados y se los hace circular cuesta abajo, después de lo cual se combinan junto con iones (H^+), con un fuerte aceptor de electrones (O_2), para formar moléculas estables de H_2O . Vista desde este modo, la fotosíntesis utiliza energía luminosa para llevar electrones cuesta arriba, retirándolas del agua hacia un aceptor de electrones más débil, el CO_2 .

La fotosíntesis involucra dos conjuntos separados de reacciones químicas, las que ocurren con luz y las que ocurren en la oscuridad. Las reacciones que ocurren en la luz se producen en los tilacoides, que son sacos aplanados que forman parte de la membrana interna de los cloroplastos y que contienen los pigmentos fotosintéticos como la clorofila, carotenoides y xantofilas. En la fase luminosa se realiza la absorción de energía luminosa por los pigmentos y la transferencia de electrones para producir compuestos de energía bioquímica como la Adenosín-trifosfato (ATP), y la Nicotiamida-Adenina Dinucleotido fosfato (NADPH) vía el proceso llamado fosforilación. La energía almacenada durante esta fase luminosa es luego utilizada en la fase oscura para la reducción bioquímica del CO_2 a azúcares mediante el proceso conocido como ciclo de Calvin

2.5.2 Cloroplastos: estructuras y pigmentos fotosintéticos

Los cloroplastos son los orgánulos celulares que en los organismos eucariotes fotosintetizadores se ocupan de la fotosíntesis. Se encuentran cloroplastos de muchos tamaños y formas en diversos tipos de vegetales (Kirk y Thilney-Bassett, 1978; Poshingham, 1980; Wellburn, 1987). Dichos cloroplastos surgen de diminutos protoplastidios (plastidios inmaduros, pequeños y casi incoloros, con poca o casi ninguna membrana interna). Los protoplastidios se dividen a medida que se desarrolla el embrión y devienen en cloroplastos al formarse los tallos y las hojas.

Cada cloroplasto está rodeado por un sistema de doble membrana o envoltura que controla el tránsito de moléculas hacia dentro y fuera (ver Figura 9). En el interior del cloroplasto se encuentra el material amorfo y gelatinoso llamado estroma, el cual es rico en enzimas que convierten el CO_2 en carbohidratos en especial almidón. Embebidos por todo el estroma están los tilacoides (del griego tilakos, saco o bolsita) que contienen pigmentos y en los cuales se utiliza la energía de la luz para oxidar H_2O y formar ATP y NADPH, ricos en energía, necesarios a su vez para que el estroma convierta el CO_2 en energía. En ciertas porciones del cloroplasto se localizan pilas de tilacoides a las que se conoce como grana. La región en que un tilacoide está en contacto con otro se denomina región apesada, éstas regiones del tilacoide efectúan fotorreacciones un poco diferentes de las que se realizan en zonas sin apresar y en los tilacoides estromáticos, pues ambos están en contacto directo con el estroma. Los tilacoides estromáticos son más alargados y conectan un elemento de grana con otro, extendiéndose por todo el estroma. Entre las dos membranas de cada tilacoide hay una cavidad llamada lumen, la cual está llena de agua y sales disueltas.

Los pigmentos presentes en los tilacoides consisten sobre todo en dos tipos de clorofilas (verdes), clorofila A y clorofila B. También se presentan pigmentos amarillo-naranja que se clasifican como carotenoides. Hay dos tipos de carotenoides: los carotenoides que son hidrocarbonados puros y las xantofilas, que contienen oxígeno. Ciertos carotenoides (en especial la xantofina, una xantofila) también se presentan en la envoltura del cloroplasto, dándole un color amarillento.

Todas las clorofilas y la mayoría o todos los carotenoides, están embebidos en los tilacoides y se encuentran unidos por enlaces no covalentes a moléculas de proteínas.

Los principales procesos en la fotosíntesis ocurren en los cloroplastos. En plantas del tipo C₃, como es el caso de la papa, muchos de los cloroplastos están localizados en las células del mesófilo de las hojas. Se distinguen 3 procesos importantes:

1. Absorción de fotones por los pigmentos, principalmente la clorofila, asociada con dos fotosistemas. Los pigmentos contenidos por los tilacoides absorben una mayor parte de la PAR. Ellos transfieren la energía de excitación a los centros de reacción de los fotosistemas donde inician procesos secundarios.
2. Electrones derivados de la separación de moléculas de agua con la producción simultánea de oxígeno son transportados a lo largo de una cadena de transporte de electrones en los tilacoides. La Nicotiamida-Adenina Dinucleotido fosfato (NADPH) y Adenosín-trifosfato(ATP) producidas en este proceso, son usadas en el tercer proceso. Debido a que estas dos reacciones dependen de la energía luminosa, ellas son llamadas las reacciones luminosas de la fotosíntesis.
3. El NADPH y el ATP son usados en el ciclo de reducción de carbono fotosintético (ciclo de Calvin), en el cual el CO₂ es asimilado, ocasionando la síntesis de compuestos C₃ (triosa-fosfato). Este proceso puede producirse en la ausencia de luz y se conoce como la reacción oscura de la fotosíntesis.

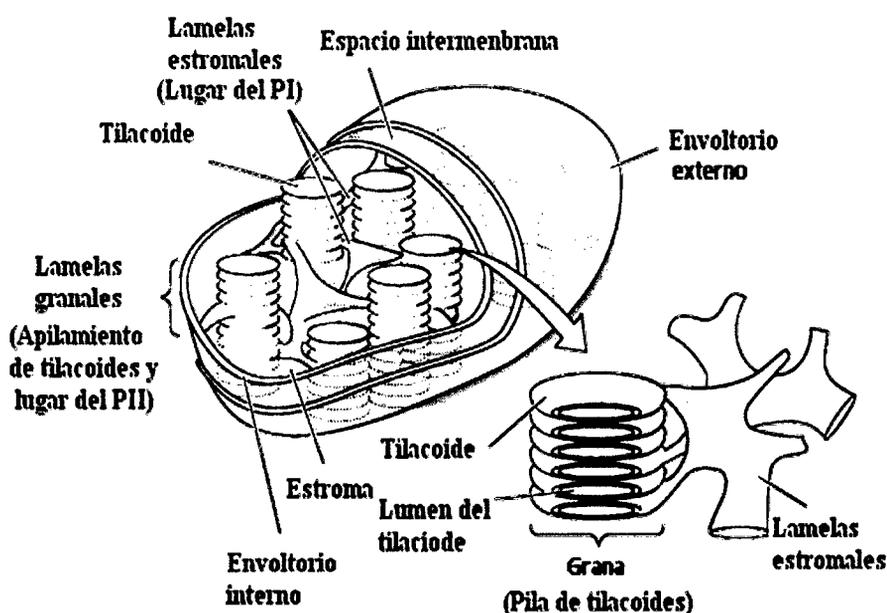


Figura 9. Cloroplasto (Taiz y Zeiger, 2004).

2.5.3. Fases de la fotosíntesis

La fotosíntesis consta de dos procesos o fases, el primer proceso depende de la luz, ya que necesita la energía directa del sol para elaborar las moléculas transportadoras necesarias para el segundo proceso; y el proceso independiente de la luz (o reacción oscura) que utiliza los productos de la reacción lumínica con el fin de formar enlaces covalentes de carbono-carbono (C – C) de los carbohidratos. En el proceso independiente de la luz, a través de la incorporación de hidrógeno (H), se captura y se modifica el dióxido de carbono procedente de la atmósfera, para así formar los carbohidratos (CH₂O)_n. La incorporación de dióxido de carbono en el interior de los componentes orgánicos se conoce como fijación de carbono. Normalmente, las reacciones de la fase oscura se realizan en la oscuridad, siempre y cuando los transportadores energéticos procedentes del proceso lumínico estén presentes.

2.5.3.1. Reacción lumínica

Esta reacción tiene lugar en los tilacoides de los cloroplastos. Los pigmentos presentes en los tilacoides se encuentran organizados en fotosistemas. Los fotosistemas son subunidades estructurales de la clorofila y otros pigmentos empaquetados y dispuestos dentro de los tilacoides. Las células eucariotas disponen del fotosistema II (FSII) y fotosistema I (FSI). El FSI utiliza clorofila A, en una forma especial denominada P700 mientras que el FSII utiliza clorofila A, pero en otra forma especial, el P680. Ambas formas activas de la clorofila A funcionan en la fotosíntesis gracias a la asociación con la membrana del tilacoide.

La luz es recibida en el FSII por la clorofila P680 que se oxida liberando un electrón que asciende a un nivel superior de energía; ese electrón es recogido por una sustancia aceptora de electrones que se reduce, la Plastoquinona (PQ), y desde ésta va pasando a lo largo de una cadena transportadora de electrones entre los que están varios citocromos (cyt b/f) y así llega hasta la Plastocianina (PC) que se los cederá a moléculas de clorofila del FSI. En el descenso por esta cadena, con oxidación y reducción en cada paso, el electrón va liberando la energía que tenía en exceso; energía que se utiliza para bombear protones de hidrógeno desde el estroma hasta el interior de los tilacoides, generando un gradiente electroquímico de protones. Estos protones vuelven al estroma a través de la ATP-asa y se originan moléculas de ATP.

El FSII se reduce al recibir electrones procedentes de una molécula de H₂O, que también por acción de la luz, se descompone en hidrógeno y oxígeno, en el proceso llamado fotólisis del H₂O. De este modo se puede mantener un flujo continuo de electrones desde el agua hacia el FSII y de éste al FSI.

En el FSI la luz produce el mismo efecto sobre la clorofila P700, de modo que algún electrón adquiere un nivel energético superior y abandona la molécula, este electrón es recogido por otro aceptor de electrones, la Ferredoxina y pasa por una nueva cadena de transporte hasta llegar a una molécula de NADP⁺ que es reducida a NADPH, al recibir dos electrones y un protón H⁺ que procede de la descomposición del H₂O.

Los dos fotosistemas pueden actuar conjuntamente, proceso conocido como esquema en Z, para producir la fotofosforilación o hacerlo solamente el FSI. Se diferencia entonces entre fotofosforilación no cíclica o acíclica cuando actúan los dos fotosistemas y

fotofosforilación cíclica cuando actúa únicamente el FSI. En la fotofosforilación acíclica se obtiene ATP y se reduce el NADP^+ a NADPH mientras que en la fotofosforilación cíclica únicamente se obtiene ATP y no se libera oxígeno.

La fotofosforilización es el proceso por el cual la energía lumínica, en forma de electrones excitados, se convierte en un enlace pirofosfato con una molécula de ADP generando la molécula de ATP. Este hecho ocurre cuando la luz, en presencia de P680, excita los electrones del agua. La transferencia energética es similar al transporte electrónico de la mitocondria. La energía lumínica origina la liberación de un electrón a partir de una molécula de P680 que forma parte del FSII. El P680 necesita un electrón, que lo incorpora a partir de una molécula de agua. El agua se escinde en iones de hidrogeno (H^+) y oxígeno (O). De esta forma este electrón salta a un nivel energético superior y se une al receptor electrónico primario, con lo que se inicia una serie de reacciones redox, pasando el electrón por diversos transportadores electrónicos, para finalmente unirse a una molécula del FSI (ver Figura 10).

Cuando la luz incide sobre la molécula de P700 en el FSI, se origina el salto de un electrón a un potencial superior. Este electrón se une a un receptor primario diferente (que es una molécula diferente de la que está relacionada con el FSII). El electrón pasa otra vez por una serie de reacciones redox, y finalmente se une al NADP^+ y al H^+ para formar el NADPH, transportador energético necesario en la reacción independiente de la luz. El electrón del FSII reemplaza al electrón excitado de la molécula P700. Y así es como se produce un continuo flujo de electrones del agua al NADPH. Esta es la energía utilizada para la fijación del carbono. En el FSII, los gradientes de electrones establecidos en la membrana del tilacoide dirigen el bombeo de iones H en el interior del tilacoide y la conversión de $\text{ADP} + \text{P}$ en ATP.

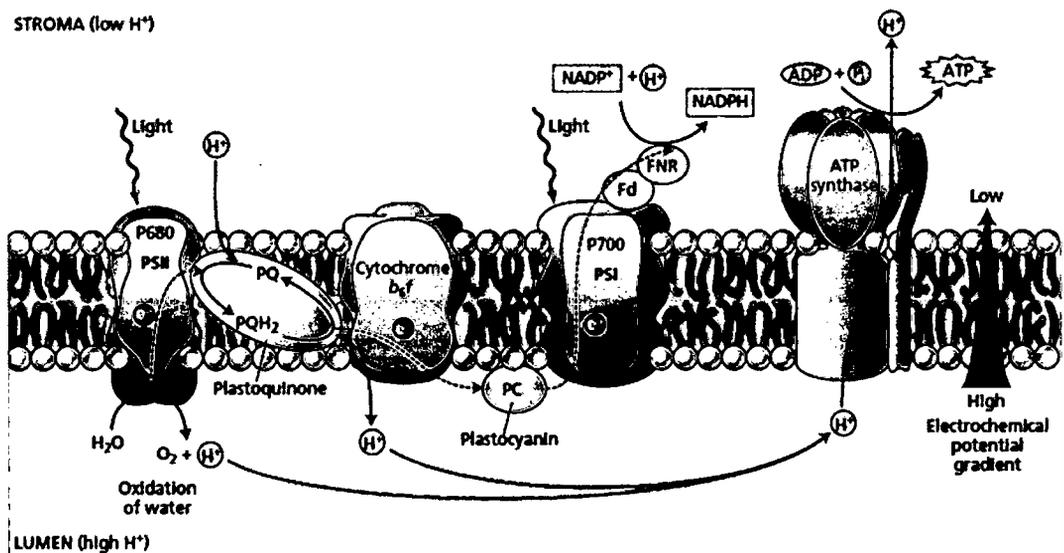


Figura 10. Fase luminosa (Taiz y Zeiger, 2004).

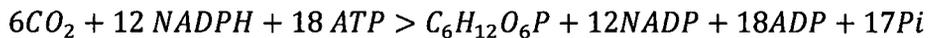
Los sistemas vivos no pueden utilizar directamente la luz como fuente energética, pero pueden, a través de una serie de reacciones transformarla en energía de enlace C – C, para poder liberarla en la glucólisis (descomposición de la glucosa) y en otros procesos metabólicos.

2.5.3.2. Reacción oscura o ciclo de Calvin-Benson

El ciclo de Calvin (también conocido como ciclo de Calvin-Benson o fase de fijación del CO₂ de la fotosíntesis) consiste en una serie de procesos bioquímicos que se realizan en el estroma de los cloroplastos de los organismos fotosintéticos. En los cuales a partir de CO₂ se pueda crear moléculas orgánicas tales como carbohidratos, lípidos y aminoácidos.

Existe una enzima que interviene en el ciclo y que fija el CO₂ atmosférico uniéndolo a una molécula orgánica (ribulosa-1,5-bisfosfato) se denomina RuBisCO (por las siglas de Ribulosa bisfosfato carboxilasa-oxigenasa).

Para un total de 6 moléculas de CO₂ fijado, la estequiométrica final del ciclo de Calvin se puede resumir en la ecuación:



Que representaría la formación de una molécula de azúcar-fosfato de 6 átomos de carbono (hexosa) a partir de 6 moléculas de CO₂

Fases del ciclo Calvin

El ciclo está dividido en tres fases:

1ª Fase: Fijación del CO₂

La RuBisCO cataliza la reacción entre la ribulosabifosfato (una pentosa, es decir un monosacárido de 5C, RuBP) con el CO₂, para crear 1 molécula de 6 carbonos, la cual al ser inestable termina por separarse en 2 moléculas que contienen 3 átomos de carbono cada una, el fosfoglicerato (PGA). La importancia de la RuBisCO queda indicada por el hecho de ser la enzima más abundante en la naturaleza.

2ª Fase: Reducción

Primero ocurre un proceso de activación en el cual una molécula de ATP, proveniente de la fase fotoquímica, es usada para la fosforilización del PGA, transformándolo en difosfoglicerato. Esa transferencia de un enlace fosfato permite que una molécula de NADPH+H⁺ reduzca el PGA, mediante la acción de la enzima gliceraldehído -3-fosfato-deshidrogenasa, para formar gliceraldehído -3-fosfato (PGAL). Esta última molécula es una triosa - fosfato, un azúcar de tipo aldosa con 3C, que es una molécula estable y con mayor energía libre (capaz de realizar mayor cantidad de trabajo) que las anteriores. Parte de PGAL se transforma en su isómero dihidroxiacetona - fosfato (cetosa de 3C). Estas dos triosas-fosfato serán la base a partir de la cual se formen el resto de azúcares (como la fructosa y glucosa), oligosacáridos (como la sacarosa o azúcar de caña) y polisacáridos (como la celulosa o el almidón). También, a partir de estos azúcares, se formarán directa o indirectamente las cadenas de carbono que componen el resto de biomoléculas que constituyen los seres vivos (lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc.).

3ª Fase: Regeneración

El ciclo continua a lo largo de una serie de reacciones hasta formar ribulosa -fosfato, que mediante el consumo de otra molécula de ATP, regenera la ribulosabisfosfato (RuBP) original, dejándola disponible para que el ciclo se repita nuevamente.

Por tanto, por cada vuelta del ciclo se incorpora una molécula de carbono fijado (CO_2) a otra molécula preexistente de 5 átomos de carbono (ribulosa bisfosfato), el resultado final es la regeneración de la molécula de 5 átomos de carbono y la incorporación de un nuevo carbono en forma orgánica $\text{C}(\text{H}_2\text{O})$. Para comprenderlo hay que tener en cuenta que el producto fundamental del ciclo de Calvin es el gliceraldehído-3-fosfato (de 3 átomos de carbono), molécula que sirve como base para la síntesis del resto de carbohidratos. Tras 3 vueltas del ciclo, una nueva molécula de PGAL sale de éste y puede ser posteriormente utilizada para la formación de otras moléculas. Las diferentes etapas del ciclo de Calvin se aprecian en la Figura 11

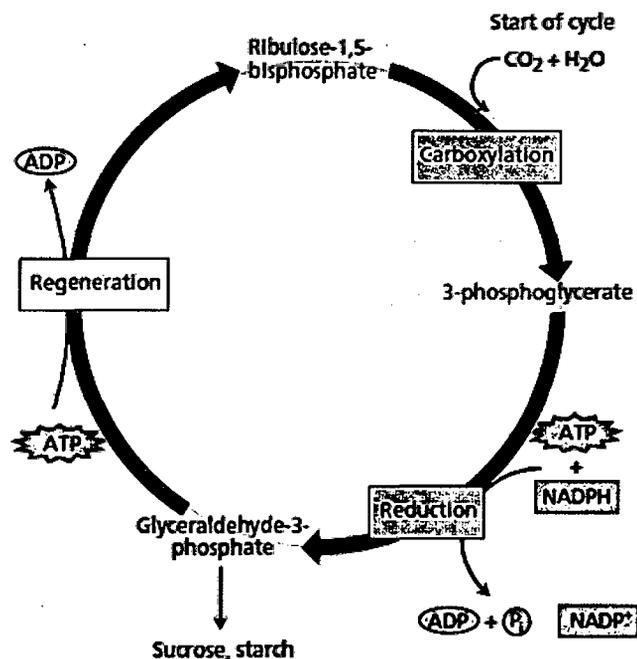


Figura 11. Ciclo de Calvin (Taiz y Zeiger, 2004).

Durante años se pensó que el ciclo de Calvin era independiente de la luz y se denominó fase oscura de la fotosíntesis. Hoy en día se conoce perfectamente que tanto la actividad de la Rubisco como de otras enzimas claves del ciclo es regulada por la luz, desactivándose en condiciones de oscuridad y reactivándose en condiciones de iluminación.

A bajas concentraciones de CO_2 (como cuando se cierran los estomas para evitar pérdida de agua en la planta), la Rubisco reaccionara con O_2 en vez de CO_2 . Esta reacción provoca una disminución del porcentaje de carbono fijado y está asociada al fenómeno denominado fotorrespiración. Estos procesos son más graves a temperaturas relativamente altas, disminuyendo la tasa de fotosíntesis (una medida de la capacidad de la planta para asimilar CO_2).

Capítulo 3.

Desarrollo del modelo de predicción de biomasa neta

3.1. Introducción

La fotosíntesis del follaje presenta dos dificultades al modelador, referidas básicamente a la integración sobre el tiempo y el espacio. Estas dificultades son erróneamente descritas algunas veces como problemas de escalamiento. Por lo general el tiempo de ejecución es mucho mayor de lo que el modelador desearía, siendo más específicos podemos considerar si es posible correr el modelo con un periodo diario, en lugar de un lapso de 10 minutos, o si fuera posible evitar una integración numérica bajo el estrato superior de la cobertura vegetal y quizás bajo el perfil de suelo, sería una ganancia en tiempo y esfuerzo computacional. Sin embargo, estas consideraciones deben ser alcanzadas con aceptable realismo dependiendo del objetivo y las necesidades del modelador.

El modelo de simulación de biomasa neta de plantas del tipo C3 que presento se basa principalmente en el trabajo de fotosíntesis instantánea de follaje realizado por Thornley (2002); que considera la fijación de gramos de dióxido de carbono a partir de la conversión del flujo de fotones fotosintéticos en materia seca. El modelo de Thornley (2002) considera cuatro importantes supuestos. Primero que el follaje es cerrado en el sentido que es horizontalmente uniforme. Segundo que hay un decaimiento exponencial de la luz en los estratos inferiores del follaje, con la misma constante de decaimiento para la luz desde diferentes partes del cielo. Tercero que la respuesta fotosintética de la hoja puede ser descrita por el modelo de la hipérbola no rectangular (NHR) y, por último, que la dependencia lumínica de una hoja individual es resumida por un solo parámetro del modelo NHR, que describe la tasa fotosintética saturada por luz, la cual se asume proporcional a la irradiancia promedio de las hojas en el lugar. Combinando estos 4 supuestos podemos desarrollar un modelo algebraico que nos permite describir la fotosíntesis instantánea del follaje, el cual es computacionalmente eficiente ya que evita la necesidad de integrar numéricamente el proceso de fotosíntesis en los estratos inferiores del follaje. Además de estos 4 importantes supuestos, el modelo se caracteriza por considerar un conjunto de estratos del follaje en los que se diferencian las hojas iluminadas de las sombreadas mediante la separación de la irradiación incidente en irradiancia directa y difusa.

El modelo de fotosíntesis instantánea del follaje define el proceso fotosintético de hojas iluminadas y sombreadas a partir del conocimiento del nivel de iluminación en un instante de tiempo, estrictamente hablando la productividad del follaje debe ser calculada continuamente en el curso de un día para obtener la productividad diaria total.

Las modificaciones que se introducen al modelo de Thornley (2002) se refieren a convertir el modelo de fotosíntesis instantánea del follaje en un modelo dinámico, de tal manera que permita integrar los gramos de CO₂ fijados por la planta desde la siembra hasta el final de la cosecha. Un modelo dependiente del tiempo requiere remplazar parámetros biológicos y climáticos que son considerados constantes en el modelo de Thornley (2002) por parámetros dinámicos que sean función del estado fenológico de la planta, el tiempo y el lugar geográfico. Estos parámetros son; 1) el coeficiente de extinción de luz (k); 2) el porcentaje de transmisión de luz PAR a través de la hoja (m)-

parámetro que caracteriza el estado vegetativo de la planta a partir del contenido relativo de clorofila - ;3) la fracción difusa de la radiación PAR incidente (I_{diff0}) y 4) el índice de área foliar (LAI). Todos estos parámetros constituyen parte del modelo y fueron calculados utilizando técnicas de percepción remota, lo que permitió realizar un análisis no intrusivo, no destructivo y periódico.

La introducción de estas variaciones en el modelo de Thornley (2002) exigió entender y resolver las ecuaciones planteadas por el autor. La acumulación de fotosintatos por unidad de área de hoja se calculó empleando una integración numérica con un paso horario, ya que algunos parámetros, como es el caso del coeficiente de extinción de luz y la fracción difusa de la radiación PAR incidente no pueden ser considerados constantes a lo largo del día, debido a que presentan un patrón no lineal desde la salida hasta la puesta del sol, por ser función del ángulo cenital solar, la hora del día, etc. Dejar de tomar en cuenta estos detalles provocaría una subestimación o sobrestimación del fotosintato producido por la planta.

La simulación de fotosíntesis del follaje es el primer paso para la obtención de la biomasa neta de plantas del tipo C3 como la papa, ya que la fotosíntesis es el proceso principal que permite el incremento de la materia seca en las plantas, pero también existen otros procesos como la respiración autotrófica que consumen parte de esta energía química producida durante la fotosíntesis y es utilizada para realizar procesos de crecimiento y mantenimiento que disminuyen la formación de materia seca.

3.2. Estructura del modelo de fotosíntesis del follaje

3.2.1. Perfil de luz en el estrato superior del follaje

La fotosíntesis y por consiguiente la asimilación de suministros es fuertemente dependiente de la luz. La fracción de luz que alcanza el suelo atravesando el follaje y absorbida por la fotosíntesis, generalmente declina exponencialmente con el índice de área foliar (Sands, 1995; Monsi y Saeki, 1953) según:

$$I(L) = I_0 e^{-kL} \quad \dots (3 - 1)$$

$$I_{\text{leaf}}(L) = \frac{k}{1 - m} I(L) = \frac{k}{1 - m} I_0 e^{-kL} \quad \dots (3 - 2)$$

Donde:

I_0 (JPAR $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), se refiere a la irradiancia incidente sobre el estrato superior del follaje.

k ($\text{m}^2\text{suelo}/\text{m}^2\text{hoja}$), es el coeficiente de extinción de radiación.

L ($\text{m}^2\text{hoja}/\text{m}^2\text{suelo}$), es el índice de área foliar acumulativo (LAI).

El coeficiente de extinción k , representa la intercepción de radiación afectada por el ángulo de inclinación de las hojas. El valor de k depende del tipo de luz, la posición y las características de la hoja y varía a lo largo del día según el ángulo cenital solar. Considerando una distribución angular esférica, con hojas distribuidas al azar dentro del volumen del follaje, el coeficiente de extinción según Goudriaan (1977, 1982) se define como:

$$k = \frac{1}{2 \sin(\theta)}$$

La transmitancia de la hoja (m) se puede calcular integrado la energía PAR que se transmite a través de la hoja. La transmitancia caracteriza el estado fisiológico de la hoja y es un indicador de la concentración de pigmentos en las hojas.

La transmitancia de luz en hojas (m), por lo general representa el 10% de la energía PAR incidente, y es sensible a la concentración de clorofila A en las hojas, por lo que podemos considerar:

$$m = \frac{Cl_A_{max}}{Cl_A} * 0.1$$

Donde:

Cl_A: Concentración relativa de clorofila A.
Cl_A_{max}: Concentración relativa máxima de clorofila A.

3.2.2. Fotosíntesis de hoja

Existen dos grupos importantes de modelos de fotosíntesis de hoja; los basados en la densidad de flujo de fotones (PFD) y los que consideran el flujo de CO₂.

Los modelos que consideran la PFD se basan en la energía solar incidente, mientras que los basados en el flujo de CO₂, definen la tasa de concentración de CO₂ y el sistema de transporte de electrones de la hoja. La estimación de la tasa fotosintética neta del último grupo es más precisa, pero sus parámetros componentes no pueden ser obtenidos a partir de datos de percepción remota.

Los modelos de tasa fotosintética basados en luz incidente, son principalmente de tres tipos:

- Los modelos tipo Michaelis-Menten;
- Los modelos tipo la ecuación exponencial asintótica; y
- Los modelos tipo Blackman o el modelo de la hipérbola no rectangular (HNR).

De estas tres opciones, el modelo de la hipérbola no rectangular, es la ecuación que utilizaremos para representar la respuesta de la tasa fotosintética de la hoja P_{leaf} (KgCO₂m⁻²s⁻¹) con respecto a la luz incidente I_{leaf} , y se define como:

$$\xi P_{leaf}^2 - P_{leaf}(\alpha I_{leaf} + P_{max}) + \alpha I_{leaf} P_{max} = 0 \quad \dots (3 - 3)$$

Las soluciones son:

$$P_{leaf} = \frac{(\alpha I_{leaf} + P_{max}) + \sqrt{(\alpha I_{leaf} + P_{max})^2 - 4\xi I_{leaf} P_{max}}}{2\xi} \quad \dots (3 - 4)$$

$$P_{leaf} = \frac{(\alpha I_{leaf} + P_{max}) - \sqrt{(\alpha I_{leaf} + P_{max})^2 - 4\xi I_{leaf} P_{max}}}{2\xi} \quad \dots (3 - 5)$$

De estas dos soluciones, la ecuación (3 - 5) es la que representa correctamente la relación entre la fotosíntesis de hoja (P_{leaf}) y la luz incidente (I_{leaf}) (ver Figura 12,

P_{leaf} vs I_{leaf} considerando: $P_{max} = 10^{-6} \text{KgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $\alpha = 10^{-8} \text{KgCO}_2 (\text{JPAR})^{-1}$ y $\xi = 0.9$).

La ecuación (3 – 5) presenta 3 parámetros:

α , eficiencia fotosintética, que determina la pendiente inicial de la curva P_{leaf} vs I_{leaf} ;
 $[\alpha] = \text{KgCO}_2 / \text{JPAR}$

P_{max} , fotosíntesis máxima, que representa la tasa fotosintética máxima saturada por luz;
 $[P_{max}] = \text{KgCO}_2 / \text{m}^2 \text{s}$

ξ , constante que determina la inclinación o el amortiguamiento de la curva P_{leaf} vs I_{leaf}
 $[\xi] = 1$

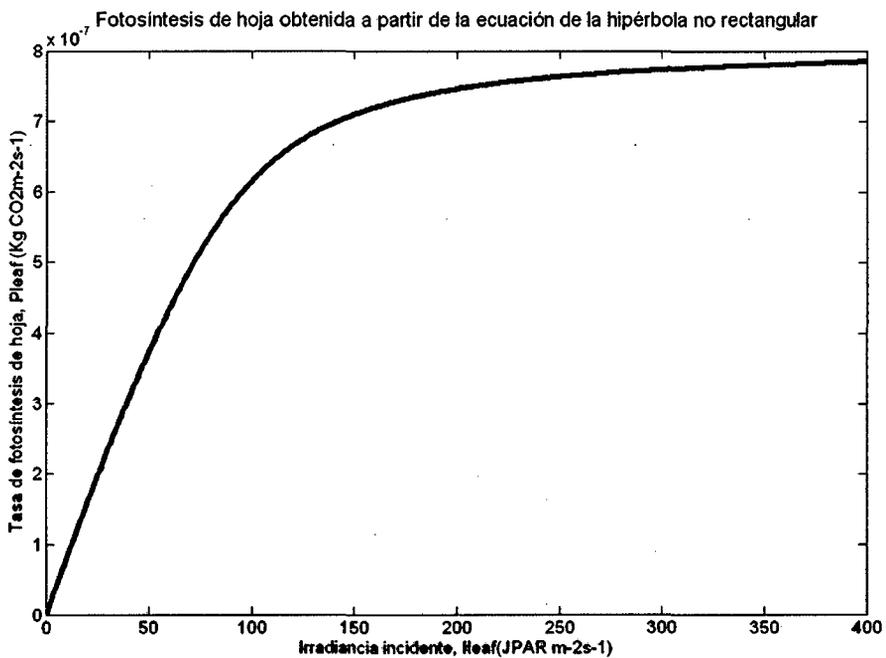


Figura 12. Fotosíntesis de hoja simulada a partir del modelo HNR.

La inversa de la eficiencia fotosintética (α), es el rendimiento cuántico, que determina la eficiencia de las plantas para convertir la energía luminosa en energía química. Este valor es aproximadamente 19 cuantos absorbidos por molécula de CO_2 fijado para hojas C_4 , y varía entre 15 y 22 para hojas C_3 , dependiendo de la temperatura (Jones, 1992, pp 204-205). El valor de ξ es usualmente calculado por ajuste de curvas, valores de 0.5 a 0.95 son comúnmente usados (Lieth y Reynolds, 1987). Es usual considerar que α y ξ son constantes bajo el estrato superior del follaje, aunque esta simplificación no es realística para P_{max} .

3.2.3. Aclimatación Fotosintética

El P_{max} o fotosíntesis máxima, es una variable que puede aclimatarse a diferentes condiciones y asumir un amplio rango de valores (Prioul *et al.*, 1980; Evans y Terashima, 1988; Pettreson y McDonald, 1994). Los factores que afectan la aclimatación de P_{max} son, el nivel de luz, contenido de nitrógeno, concentración de CO_2

ambiental y la temperatura. Edwards (1981) sugiere que una adecuada aproximación para aclimatación de P_{max} bajo el estrato superior del follaje es:

$$P_{max}(L) = P_{max0}e^{-kL} \quad \dots (3 - 6)$$

Donde P_{max0} es el valor de P_{max} para hojas completamente expuestas en el estrato superior del follaje. Para hojas C3 y C4, Jones (1992 tabla 7.3, p. 190) consideró rangos de 11 a 27 y 14 a 55 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ respectivamente. Si bien es cierto que la ecuación (3 - 6) probablemente exagera la disminución de P_{max} , especialmente para la zona inferior de un follaje con elevado índice de área foliar (LAI), esto es relativamente poco importante para follajes con elevados LAI, ya que gran parte de la fotosíntesis de la planta es desarrollada por el tercio superior del follaje (Acock *et al.*, 1978). P_{max0} puede ser determinado empíricamente o alternativamente mediante equipos que controlen el flujo de CO_2 y la densidad de flujo de fotones, como es el caso del medidor de fotosíntesis LICOR 6400, equipo que mide la tasa de fotosíntesis de plantas a partir de un sistema de intercambio de gases.

3.2.4. Hojas expuestas al sol y sombra

Para completar las ecuaciones básicas, requerimos una componente que represente el índice de área (L) de hoja expuestas a sol y a la sombra. Y lo definimos como:

$$L_{sun} = \frac{1}{k}(1 - e^{-kL}) \quad \dots (3 - 7)$$

$$L_{sha} = L - \frac{1}{k}(1 - e^{-kL}) \quad \dots (3 - 8)$$

La irradiancia sobre una superficie horizontal en la capa superior del follaje I_0 ($\text{JPARm}^{-2}\text{s}^{-1}$) comprende luz directa (I_{sun0}) y luz difusa (I_{diff0}), por lo tanto:

$$I_0 = I_{diff0} + I_{sun0} \quad \dots (3 - 9)$$

Podemos asumir una constante para calcular la fracción directa y difusa de la irradiancia total:

$$I_{sun0} = f_{sun}I_0 \quad \dots (3 - 10)$$

$$I_{diff0} = (1 - f_{sun})I_0 \quad \dots (3 - 11)$$

La fracción f_{sun} , varía entre 0 y 1, lo que permite que cantidades relativas de luz directa y difusa varíen fácilmente. f_{sun} muestra variaciones diarias y estacionales (Jones, 1992), y esta variación debe ser considerada cuando el modelo exige mayor precisión y complejidad. La irradiancia de hojas soleadas y sombreadas a una profundidad L en el follaje se estima remplazando la ecuación (3 - 9) en (3 - 2):

$$I_{leaf}(L) = \frac{k}{1 - m}(I_{diff0} + I_{sun0})e^{-kL} \quad \dots (3 - 12)$$

Para hojas iluminadas por el sol:

$$I_{leaf}(Sun, L) = \frac{k}{1-m} (I_{sun0} + I_{diff0} e^{-kL}) \quad \dots (3-13)$$

Para hojas sombreadas:

$$I_{leaf}(Sha, L) = \frac{k}{1-m} (I_{diff0} e^{-kL}) \quad \dots (3-14)$$

Asumiendo que la orientación de las hojas es aleatoria, la contribución de la luz solar dispersada por el follaje a la componente difusa de la luz es ignorada.

3.2.5. Separación de hojas expuestas al sol de las hojas sombreadas

La razón para separar la contribución de las hojas sombreadas y las hojas expuestas al sol, es considerar la respuesta no lineal de las hojas al estar expuestas a diferentes intensidades de luz. La fotosíntesis de follaje $P_{Canopy}(\text{KgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1})$ y sus componentes de sol y sombra, P_{sun} y P_{sha} respectivamente están dados por:

$$P_{Canopy} = \int_0^{Canopy} P_{Leaf}(L) dL$$

$$P_{Canopy} = \int_0^{Canopy} P_{Leaf}(Sun) dL_{Sun} + \int_0^{Canopy} P_{Leaf}(Shade) dL_{Sha} \quad \dots (3-15)$$

De (3-7) y (3-8), obtenemos que:

$$dL_{Sun} = dL e^{-kL}$$

$$dL_{Sha} = dL(1 - e^{-kL})$$

Para ordenarnos calcularemos la contribución de fotosíntesis de follaje de hojas expuestas al sol y a la sombra por separado, según:

$$P_{Canopy} = P_{Sun} + P_{Sha}$$

$$P_{Sun} = \int_0^L P_{Leaf}[I_{Leaf}(Sun)] e^{-kL} dL \quad \dots (3-16)$$

$$P_{Sha} = \int_0^L P_{Leaf}[I_{Leaf}(Shade)] (1 - e^{-kL}) dL \quad \dots (3-17)$$

Remplazando (3-5) en (3-16):

$$P_{Sun} = \int_0^L \left(\frac{\alpha I_{Leaf}(sun) + P_{max} - \sqrt{(\alpha I_{leaf}(sun) + P_{max})^2 - 4\xi \alpha I_{Leaf}(sun) P_{max}}}{2\xi} \right) * e^{-kL} dL \quad \dots (3-18)$$

Ahora (3-13) en (3-18) y considerando:

$$P_{Sun} = A + B + C$$

Con:

$$Z = \frac{\alpha k}{1-m} \quad \wedge \quad F(L) = I_{Sun0} + I_{diff0} e^{-kL}$$

Donde:

$$A = \int_0^L \frac{Z}{2\xi} F(L) e^{-kL} dL \quad \dots (3-19)$$

$$B = \int_0^L \frac{P_{max} e^{-kL}}{2\xi} dL \quad \dots (3-20)$$

$$C = - \int_0^L \left(\frac{\sqrt{([ZF(L) + P_{max}]^2 - 4\xi ZF(L) P_{max}) e^{-kL}}}{2\xi} \right) dL \quad \dots (3-21)$$

Para simplificar las ecuaciones llamaremos:

$$P_{S0} = \frac{\alpha k}{1-m} I_{Sun0}$$

$$P_{D0} = \frac{\alpha k I_{Diff0}}{1-m}$$

$$P_{DP0} = P_{D0} + P_{max0} \quad \dots (3-22)$$

Remplazando (3-22) en (3-19), (3-20) y (3-21)

$$A = \int_0^{L_0} \frac{P_{S0} e^{-kL} + P_{D0} e^{-2kL}}{2\xi} dL \quad \dots (3-23)$$

$$B = \int_0^{L_0} \frac{P_{max0} e^{-2kL}}{2\xi} dL \quad \dots (3-24)$$

$$C = - \int_0^{L_0} \left[\frac{\sqrt{([P_{S0} + P_{DP0}e^{-kL}]^2 - 4\xi(P_{S0} + P_{D0}e^{-kL})P_{max0}e^{-kL})}}{2\xi} \right] e^{-kL} dL \quad \dots(3-25)$$

Si:

$$u = e^{-kL}$$

$$du = e^{-kL}(-k)dL \Rightarrow dL = -\frac{du}{uk} \quad \dots(3-26)$$

Realizando un cambio de variable, utilizando (3-25) en (3-22), (3-23) y (3-24):

$$A = - \int_1^{e^{-kL_0}} \left(\frac{P_{S0} + uP_{D0}}{2\xi k} \right) du$$

$$B = - \int_1^{e^{-kL_0}} \frac{uP_{max0}}{2\xi k} du$$

$$C = - \int_1^{e^{-kL_0}} \left(\frac{\sqrt{(P_{S0} + uP_{DP0})^2 - 4\xi(P_{S0} + uP_{D0})uP_{max0}}}{2\xi k} \right) du$$

Simplificando:

$$P_{Sun} = A + B + C$$

$$P_{Sun} = \int_{e^{-kL_0}}^1 \left(\frac{P_{S0} + uP_{DP0} - \sqrt{(P_{S0} + uP_{DP0})^2 - 4\xi(P_{S0} + uP_{D0})uP_{max0}}}{2\xi k} \right) du$$

Reordenando cuadrados:

$$a = P_{S0}^2$$

$$b = 2P_{S0}(P_{DP0} - 2\xi P_{max0})$$

$$c = P_{DP0}^2 - 4\xi P_{D0}P_{max0}$$

Tenemos que:

$$P_{Sun} = \int_{e^{-kL_0}}^1 \left(\frac{P_{S0} + uP_{DP0} - \sqrt{cu^2 + bu + a}}{2k\xi} \right) du$$

$$P_{Sun} = \left(\frac{1}{2k\xi} \right) \left[\int_{e^{-kL_0}}^1 P_{S0} du + \int_{e^{-kL_0}}^1 P_{DP0} u du - \int_{e^{-kL_0}}^1 \sqrt{cu^2 + bu + a} du \right]$$

Completando cuadrados:

$$I = \int_{e^{-kL_0}}^1 \sqrt{cu^2 + bu + a} du = \int_{e^{-kL_0}}^1 \sqrt{c \left(u^2 + 2 \left(\frac{b}{2c} \right) u + \frac{b^2}{4c^2} - \frac{b^2}{4c^2} + \frac{a}{c} \right)} du$$

$$I = \int_{e^{-kL_0}}^1 \sqrt{c \left[\left(u + \frac{b}{2c} \right)^2 + \frac{a}{c} - \frac{b^2}{4c^2} \right]} du$$

Realizando remplazos e integrando, calculamos I :

$$I = \left[\frac{\frac{b\sqrt{a}}{2\sqrt{c}} - \left(\sqrt{e^{-kL_0} + \frac{b}{2c} + \frac{a}{c} - \frac{b^2}{4c^2}} \right) \left(e^{-kL_0} + \frac{b}{2c} \right)}{2 \left(\frac{a}{c} - \frac{b^2}{4c^2} \right)} \right] + \frac{1}{2} \text{Ln} \left| \frac{\frac{b}{2c} + \sqrt{\frac{a}{c}}}{e^{-kL_0} + \frac{b}{2c} + \sqrt{\left(e^{-kL_0} + \frac{b}{2c} \right)^2 + \frac{a}{c} - \frac{b^2}{4c^2}}} \right|$$

Finalmente la fotosíntesis de follaje para hojas expuestas al sol se define como:

$$P_{Sun} = \left(\frac{1}{2k\xi} \right) \left[P_{S0}(1 - e^{-kL}) + \frac{P_{DP0}}{2}(1 - e^{-2kL}) - I \right] \quad \dots (3 - 27)$$

Con:

$$a = P_{S0}^2 \quad b = 2P_{S0}(P_{DP0} - 2\xi P_{max0}) \quad c = P_{DP0}^2 - 4\xi P_{D0} P_{max0}$$

$$P_{S0} = \frac{\alpha k}{1-m} I_{Sun0} \quad P_{D0} = \frac{\alpha k I_{Diff0}}{1-m} \quad P_{DP0} = P_{D0} + P_{max0}$$

De forma similar, a partir de (3 - 17), la componente correspondiente a la fotosíntesis de follaje de hojas sombreadas se define como:

$$P_{sha} = \int_0^{L_0} \left(\frac{\alpha I_{Leaf}(sha) + P_{max(L)} - \sqrt{(\alpha I_{Leaf}(sha) + P_{max(L)})^2 - 4\xi \alpha I_{Leaf}(sha) P_{max(L)}}}{2\xi} \right) * (1 - e^{-kL}) dL$$

Sabiendo que (3 - 14):

$$I_{Leaf}(sha, L) = \frac{k}{1-m} (I_{diff0} e^{-kL})$$

Consideremos:

$$P_{shade} = D + E + F$$

Por lo tanto:

$$D = \int_0^{L_0} \frac{\alpha k I_{diff0} e^{-kL}}{2\xi(1-m)} (1 - e^{-kL}) dL$$

$$E = \frac{1}{2\xi} \int_0^{L_0} P_{max0} e^{-kL} (1 - e^{-kL}) dL$$

$$F = -\frac{1}{2\xi} \int_0^{L_0} \left(\sqrt{\left(\frac{\alpha k I_{diff0} e^{-kL}}{1-m} + P_{max0} e^{-kL} \right)^2 - \frac{4\xi \alpha k I_{diff0} e^{-kL} P_{max0} e^{-kL}}{1-m}} \right) * (1 - e^{-kL}) dL$$

Remplazando en (3 - 22):

$$P_{S0} = \frac{\alpha k}{1-m} I_{Sun0}$$

$$P_{D0} = \frac{\alpha k I_{diff0}}{1-m}$$

Sea:

$$u = e^{-kL} \quad \Rightarrow \quad dL = -\frac{du}{dk}$$

$$D = \int_1^{e^{-kL_0}} \frac{P_{D0} u(u-1)}{2\xi k u} du$$

$$E = \int_1^{e^{-kL_0}} \frac{P_{max0} u(u-1)}{k u} du$$

$$F = \int_1^{e^{-kL_0}} \frac{\sqrt{(P_{D0} u + P_{max0} u)^2 - 4\xi P_{D0} u^2 P_{max0} (1-u)}}{3\xi k u} du$$

$$P_{sha} = D + E + F$$

$$P_{sha} = \left(\frac{1}{2k\xi} \right) \left(\frac{P_{D0} + P_{max0} - \sqrt{[(P_{D0} + P_{max0})^2 - 4\xi P_{D0} P_{max0}]} }{2k\xi} \right) *$$

$$\left(1 - e^{-kL_0} - \frac{1 - e^{-2kL_0}}{2} \right)$$

... (3 - 28)

Finalmente la fotosíntesis del follaje se resume en las ecuaciones presentadas en (3 - 27) y (3 - 28):

$$P_{Canopy} = P_{sun} + P_{sha} \quad \dots (3 - 29)$$

Donde: $[P_{Canopy}] = mgCO_2m^{-2}s^{-1}$

La ecuación que se muestra en (3 - 29), representa la fotosíntesis instantánea del follaje para hojas expuestas al sol y hojas sombreadas, y se define como la biomasa gruesa o la energía total acumulada por la planta durante la fotosíntesis. La biomasa gruesa también es conocida como productividad primaria gruesa (PPG)

La Figura 13, que se muestra a continuación, ilustra la dependencia entre la tasa de asimilación de CO₂ del follaje de plantas de papa de la variedad Canchan y la PAR incidente, descrito por el modelo de fotosíntesis instantánea de follaje que se resume en la ecuación (3 - 29), simulada para diferentes valores del índice de área foliar (LAI = 1,2,3 y 4) y una fotosíntesis máxima saturada por luz en el tope del follaje (P_{max}) de $10^{-6}KgCO_2m^{-2}s^{-1}$.

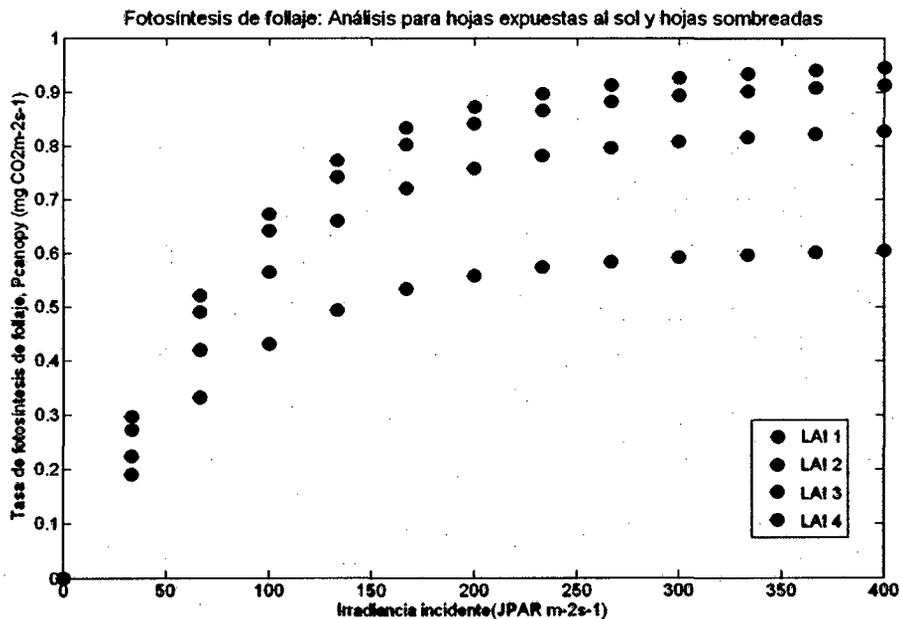


Figura 13. Tasa de fotosíntesis de follaje simulada para la variedad de papa Canchan.

La biomasa o productividad primaria es la tasa a la cual la energía lumínica es transformada por las plantas en azúcares durante el proceso de fotosíntesis. Una fracción de esta energía se pierde debido a la respiración de las plantas mientras que el resto se invierte en la formación de nuevo tejido a lo que denominamos biomasa neta o productividad primaria neta (PPN). La PPN representa entonces, el flujo neto de carbono de la atmósfera a las plantas por unidad de área y de tiempo.

3.3. Respiración autotrófica

La respiración autotrófica se refiere a la cantidad de carbono que se pierde a la atmósfera en forma de CO₂ debido a la respiración de organismos fotosintetizantes. Según McCree (1970), de 20 a 30% de la fotosíntesis total producida (PPG) se pierde debido a la respiración que necesitan realizar las plantas para procesos de crecimiento.

El proceso de respiración del follaje es influenciado por la temperatura, la edad de las plantas y la longitud del día, y no puede ser simulado a partir de herramientas de percepción remota, por tal razón la simulación de la respiración autotrófica será abordada utilizando constantes preestablecidas por publicaciones basadas en el estudio de respiración de tubérculos y modelos sencillos sobre la distribución de la materia seca en la planta.

La respiración autotrófica (R_a) es separada en respiración de mantenimiento (R_m) y respiración de crecimiento (R_g) (Running y Coughlan, 1988; Ryan, 1990; Ryan, 1991):

$$R_a = R_m + R_g = \sum_i (R_{m,i} + R_{g,i}) \quad \dots (3 - 30)$$

Donde i es un índice referido a los diferentes componentes de una planta (hojas, tallo y raíz). La respiración de mantenimiento es dependiente de la temperatura y se define como:

$$R_{m,i} = M_i r_{m,i} Q_{10}^{(T-T_b)/10} \quad \dots (3 - 31)$$

Donde M_i , es la biomasa de la componente de la planta i ; $r_{m,i}$ es el coeficiente de respiración de mantenimiento para la componente i , o la tasa de respiración a la temperatura base; Q_{10} es el factor de sensibilidad a la temperatura, y T_b es la temperatura base.

La respiración de crecimiento es generalmente considerada independiente de la temperatura y es proporcional a la PPG:

$$R_{g,i} = r_{g,i} r_{a,i} PPG \quad \dots (3 - 32)$$

Donde $r_{g,i}$ es el coeficiente de respiración de crecimiento para la componente i ; y $r_{a,i}$ es la fracción de carbono asignada a la componente i de la planta.

Tabla 1. Parámetros, unidades, valores y referencias utilizados en los cálculos de respiración de plantas de papa.

<i>Símbolo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>	<i>Referencia</i>
Q_{10}	-	Factor de sensibilidad de temperatura	2.3	Kimball <i>et al.</i> , 1997
M_{leaf}	$KgCm^{-2}$	Biomasa de hoja	0.4	Gower <i>et al.</i> , 1977
M_{stem}	$KgCm^{-2}$	Biomasa del tallo	0.28	Kimball <i>et al.</i> , 1997
M_{root}	$KgCm^{-2}$	Biomasa de la raíz	1.4	Steele <i>et al.</i> , 1997
$r_{m,leaf}$	dia^{-1}	Coefficiente de respiración de mantenimiento de hoja	0.002 a 20 °C	Kimball <i>et al.</i> , 1997
$r_{m,stem}$	$gg^{-1}dia$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de tallo.	0.001 a 20 °C	Kimball <i>et al.</i> , 1997
$r_{m,rootc}$	$gg^{-1}dia$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de raíces gruesas	0.001 a 20 °C	Kimball <i>et al.</i> , 1997
$r_{m,rootf}$	$gg^{-1}dia$	Coefficiente de respiración de mantenimiento de raíces finas	0.002 a 20 °C	Kimball <i>et al.</i> , 1997
r_g	$gg^{-1}dia$	Coefficiente de respiración de crecimiento total	0.25	Ryan, 1991
$r_{g,root}$	$gg^{-1}dia$	Coefficiente de respiración de crecimiento de raíces	0.25	Ryan, 1991
$r_{a,root}$	-	Fracción de carbono fijada a la raíz	0.4	Running y Coughlan, 1988

La respiración autotrófica de mantenimiento y de crecimiento se calculó con un periodo diario debido a que sus coeficientes, obtenidos a partir de tablas o trabajos similares (Tabla 1), consideran un paso diario a diferencia de la PPG o fotosíntesis de follaje que considera una acumulación de CO₂ horario para tomar en cuenta la respuesta no lineal de la radiación PAR incidente y la temperatura a lo largo del día. Por esta razón para calcular la respiración de crecimiento según la ecuación (3 – 32), consideramos el acumulado diario de PPG lo que permitió reducir el cálculo y tiempo computacional.

La biomasa neta o productividad primaria neta (PPN) se define como la diferencia entre la biomasa gruesa (PPG) y la respiración autotrófica (R_a), por lo tanto a partir de las ecuaciones (3 – 29) y (3 – 30) se define la PPN, como:

$$PPN = P_{canopy} - R_a \quad \dots (3 - 32)$$

La PPN es una variable ecológica fundamental no sólo porque es una medida de la acumulación de energía y asimilación de CO₂ en la biosfera, sino porque es también un importante indicador de la condición de los ecosistemas y del estatus de un amplio rango de procesos ecológicos (Whittaker, 1975; Schlesinger, 1997).

La ecuación que se muestra en (3 – 32), permite calcular la biomasa neta de plantas C3. Algunos de sus parámetros como resultan la tasa de fotosíntesis saturada por luz

(P_{max}), la eficiencia cuántica (α) y la inclinación de la curva de fotosíntesis vs la irradiancia PAR incidente (ξ), son característicos de la variedad o el tipo de planta y son obtenidos mediante equipos especializados que miden el intercambio de flujo de CO_2 de hojas expuestas a diferentes intensidad de luz y equipos de fluorescencia que miden la eficiencia de las plantas para convertir luz en carbohidratos. El resto de parámetros como; 1) el índice de área foliar (L); 2) la transmitancia de hoja - que puede ser calculada a partir de conocer las concentraciones de clorofila en las hojas - ; 3) la componente difusa de la radiación PAR incidente-componente que es considerada como una constante (f_{sun}) en el modelo de fotosíntesis instantánea de Thornley (2002) y 4) el coeficiente de extinción de luz (k), serán obtenidos periódicamente a partir de modelos y técnicas de percepción remota que serán descritos en el siguiente capítulo.

Capítulo 4.

Estimación de parámetros biofísicos que forman parte del modelo de predicción de biomasa a partir de técnicas de percepción remota

En este capítulo se describirán las técnicas que permitieron obtener parámetros biofísicos tales como; 1) Las concentraciones de clorofila A; 2) el índice de área foliar (LAI) y 3) la componente difusa de la radiación PAR incidente; datos fundamentales en el modelo de predicción de biomasa que se describió en el capítulo anterior.

Para determinar concentraciones de clorofila A en folíolos de papa se estudió una técnica no invasiva de cuantificación de clorofila basado en el uso del clorofilómetro Minolta SPAD-502 como alternativa a las técnicas tradicionales de análisis en laboratorio. El clorofilómetro Minolta SPAD-502 es un equipo portátil y comercial de percepción remota activa que brinda cantidades aparentes de clorofila y que no requiere cortar el folíolo de tal manera que el mismo folíolo puede ser evaluado a lo largo de su periodo vegetativo.

Los valores obtenidos con el clorofilómetro Minolta SPAD-502 se contrastaron con ensayos de laboratorio con el objetivo de que una vez calibrado haga las veces de patrón evitando realizar sucesivos muestreos destructivos durante el periodo vegetativo de la papa. El procedimiento de calibración del clorofilómetro Minolta SPAD-502 para hojas de papa de la variedad Canchan se encuentra en el Anexo 2. Estos resultados demostraron la sensibilidad del Minolta SPAD-502 para medir clorofila A lo cual permitió utilizarlo como referencia y validar una técnica de cuantificación de clorofila A basado en la energía que reflejan las hojas. Utilizar el clorofilómetro Minolta SPAD-502 resulta práctico cuando se requiere analizar un grupo reducido de folíolos, pero resulta ineficiente cuando se desea evaluar follaje.

4.1. Estimación de concentraciones relativas de clorofila A en hojas de papa a partir de espectros de reflectancia de hojas

4.1.1. Introducción

En años recientes, la teledetección ha hecho progresos para desarrollar métodos que relacionen datos de percepción remota y parámetros bioquímicos como la cantidad de nitrógeno en hojas, concentraciones de clorofila, carotenoides, etc. Así, equipos de percepción remota portátiles como el Minolta SPAD-502, cuyo principio de funcionamiento y validación se encuentra en el Anexo 2, puede resultar rápido y eficiente pero para el caso de evaluar extensiones grandes de terreno, se necesita una mayor disponibilidad de tiempo, equipo y personal. En estas circunstancias resulta más apropiado utilizar la energía reflejada por las plantas, ya que por intermedio de radiómetros pasivos, fotografías aéreas o satélites podemos evaluar grandes extensiones de terreno en tiempos relativamente cortos.

El rango espectral de 400 a 2700 nm ha recibido considerable atención de trabajos que estudian reflectancia en plantas, debido principalmente a que la radiación solar incidente ocurre predominantemente en esta región del espectro electromagnético incidente.

El incremento de la reflectancia en el rojo lejano (región entre 690-740 nm) es una respuesta genérica, que resulta en un indicador temprano y más consistente de estrés que otras regiones del espectro solar incidente (Carter, 1993, 1994; Carter, Cibula y Miller, 1996). Estos estudios han sugerido que alteraciones de reflectancia en el espectro visible por condiciones de estrés resultan de la sensibilidad de las concentraciones de clorofila en hojas (Knipling, 1970). Muchos estudios han mostrado que índices basados en reflectancia en el rojo lejano pueden estimar precisamente las concentraciones de clorofila en hojas (Chappelle, Kim, and McMurtrey *et al.*, 1994; Carter, Rebeck, and Percy, 1995; Gitelson, Merzlyak, and Lichtenthaler, 1996; Lichtenthaler, Gitelson, and Lang, 1996; Schepers *et al.*, 1996; Schepers *et al.*, 1996; Datt, 1998, 1999), de este modo las propiedades ópticas de la hoja cercanas a los 700 nm son cruciales para la detección de estrés en plantas y la estimación de las concentraciones de clorofila en hojas.

Los experimentos basados en las plantas *Ginkgo biloba* y *Zelkova serrata*, realizados en la universidad de Tokio, relacionaron las concentraciones de clorofila A por unidad de área (CL_A) y la primera derivada espectral de los datos de reflectancia en determinadas longitudes de onda (PDR $_{\lambda}$) (Takahiro Endo, Yoshifumi Yasuokay Masayuki Tamura, 2001). La correlación resultó bastante alta en la vecindad del eje rojo, específicamente en $\lambda = 727.5$ nm, para el caso de *Ginkgo biloba* ($R^2 = 0.85$) y $\lambda = 732.5$ nm para *Zelkova serrata* ($R^2 = 0.78$). Los resultados obtenidos para la planta *Ginkgo biloba* se pueden apreciar en la Figura 14.

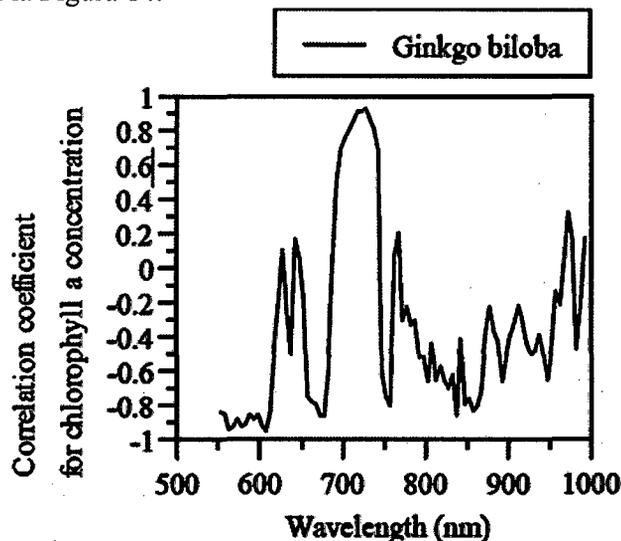


Figura 14. Correlación entre la CL_A por cada longitud de onda (T. Endo *et al.*, 2000).

Similarmente experimentos realizados en hojas de melón realizados por Takahiro Endo, Toshinuri Okuda *et al.*, 2000, encontraron una alta correlación entre los datos de la primera derivada de los espectros de reflectancia y las concentraciones de clorofila A, en $\lambda = 678$ (nm) con un $R^2 = 0.81$.

4.1.2. Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una técnica no destructiva para la evaluación de parámetros bioquímicos como las concentraciones de clorofila A, basados en espectros de reflectancia de hojas.

4.1.3. Materiales

- Li-1800 espectroradiómetro.
- Esfera integradora.
- Minolta SPAD-502.
- 3 variedades nativas de papa, con 2 repeticiones por variedad:
 - a) SA-2563.
 - b) Puma Maqui.
 - c) Purranca.

4.1.4. Metodología

El experimento se llevó a cabo dentro de un cobertor en las instalaciones del CIP – Lima. A finales de Junio del 2008. Se sembraron 3 variedades de papa las cuales luego de 5 semanas después de la siembra se sometieron a un tratamiento de estrés hídrico durante 4 semanas con el objetivo de obtener variaciones en las concentraciones de clorofila en las hojas.

Se recopilaban semanalmente datos de reflectancia a hojas de las 3 variedades de papa, específicamente las 2 hojas del lado izquierdo del tercer foliolo completamente expandido, con 2 repeticiones para cada hoja evaluando la variación en el contenido de clorofila y su tasa de disminución por unidad de tiempo en el lapso de 4 semanas. Los espectros de reflectancia fueron obtenidos mediante una esfera integradora, accesorio de percepción remota activa del LI – 1800, cuyo diseño consiste en una cámara altamente reflectante en la región visible y parte del infrarrojo, utilizando como fuente una lámpara de halógeno tungsteno que simula el espectro solar incidente.

Para validar los resultados se optó por dejar de lado las técnicas tradicionales de cuantificación de concentraciones de clorofila, como resulta la técnica de extracción de clorofila con acetona al 80%, y se utilizó como referencia el medidor de clorofila Minolta SPAD-502.

4.1.5. Análisis y Resultados

Sólo la región correspondiente a 380 y 780 nm del espectro electromagnético incidente es visible para el ojo humano. La sensibilidad del ojo humano no es la misma en todas las longitudes de onda, es máxima en 555 nm (luz amarilla-verde) y disminuye a longitudes de onda más largas (rojo) y más cortas (azul), como se puede apreciar en la Figura 15. Así por ejemplo, la sensibilidad del ojo humano a la luz roja (650 nm) es tan sólo de un 10% del máximo. En otras palabras, se necesitan diez veces más de luz roja para dar la misma impresión de brillo que la luz amarilla-verde.

Como se mencionó en el capítulo anterior (4.1.4) se seleccionó la hoja del lado izquierdo del tercer foliolo completamente expandido, para cada una de las 3 variedades de papa y se realizó un seguimiento temporal de su comportamiento espectral durante 4 semanas. Debido a que las plantas fueron sometidas a un estrés hídrico, las hojas sufrieron un progresivo proceso de degradación que se reflejó en la disminución de sus pigmentos. La disminución de pigmentos en las hojas se pudo apreciar visualmente en la última etapa del experimento, principalmente por efectos de senescencia,

específicamente en la región visible del espectro con un incremento de la reflectancia en la región verde y roja, que podemos observar como un amarillamiento de las hojas.

Esta variación en la concentración de pigmentos en las hojas se puede apreciar con mayor eficiencia utilizando sensores como los del espectroradiómetro LI – 1800 que presentan una elevada sensibilidad en la región correspondiente al rojo e infrarrojo cercano, específicamente la región correspondiente al eje rojo, entre 690 y 740 nm (Curren *et al.*, 1990).

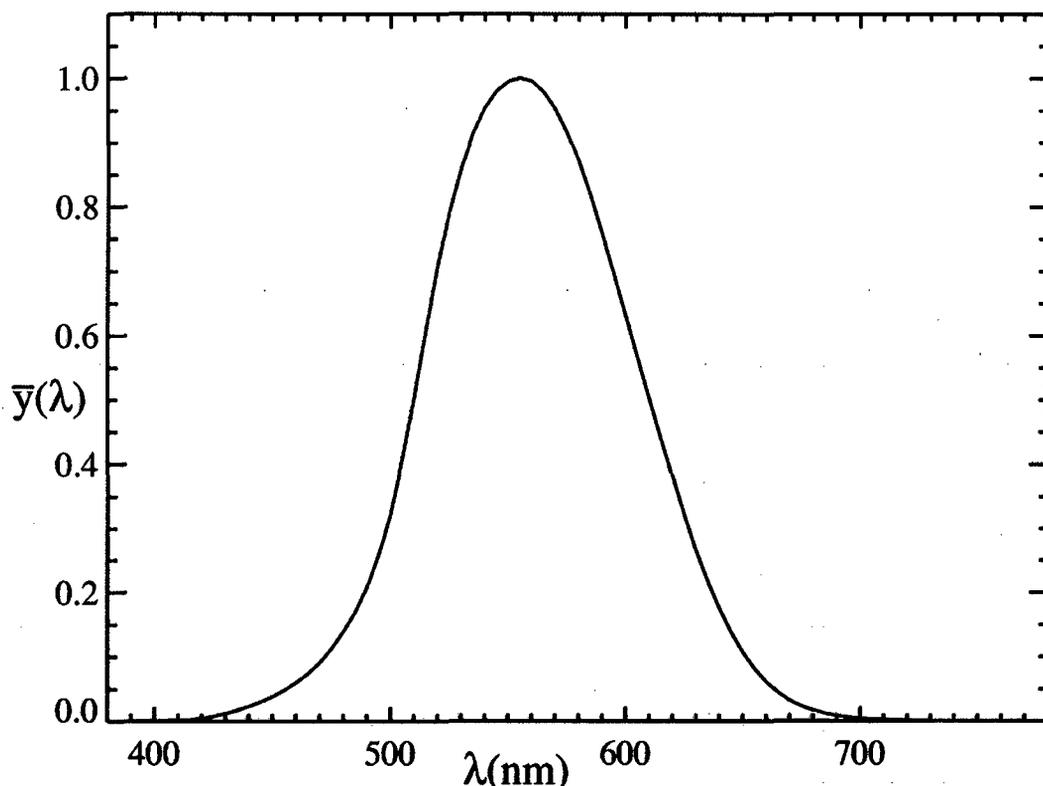


Figura 15. Sensibilidad relativa del ojo $\bar{y}(\lambda)$ a diferentes longitudes de onda (Elaboración propia).

Utilizando la esfera integradora, accesorio de percepción remota activa del espectroradiómetro LI – 1800, obtuvimos los espectros de reflectancia correspondientes a las hojas de 3 variedades de papa, mientras que el Minolta SPAD 502 proporciona los datos de concentraciones de clorofila A, que fueron usados como referencia. A partir de esta información calculamos la correlación que existe entre la primera derivada de la reflectancia (PDR_{λ}) por cada longitud de onda y las concentraciones relativas de clorofila A proporcionadas por el Minolta SPAD-502.

Las derivadas (PDR_{λ}) se calcularon según:

$$PDR_{\lambda} = \frac{R_{\lambda+1} - R_{\lambda-1}}{2}$$

Donde:

$R_{\lambda+1}$ y $R_{\lambda-1}$: Reflectancia en la longitud de onda $\lambda + 1$ y $\lambda - 1$

A los datos de reflectancia derivados por longitud de onda (PDR_λ), se les aplicó la función b-spline cúbica, que se presentan en la Figura 16, la Figura 17 y la Figura 18. La función b-spline cúbica pertenece a la familia de los c-spline y consiste en polinomios cúbicos fragmentarios determinados por una serie de puntos de control $(s_i, p_i), i = 1, 2, \dots, n$ que no se ajustan a los puntos de datos con exactitud, pero que tienen el objetivo de generar curvas continuas.

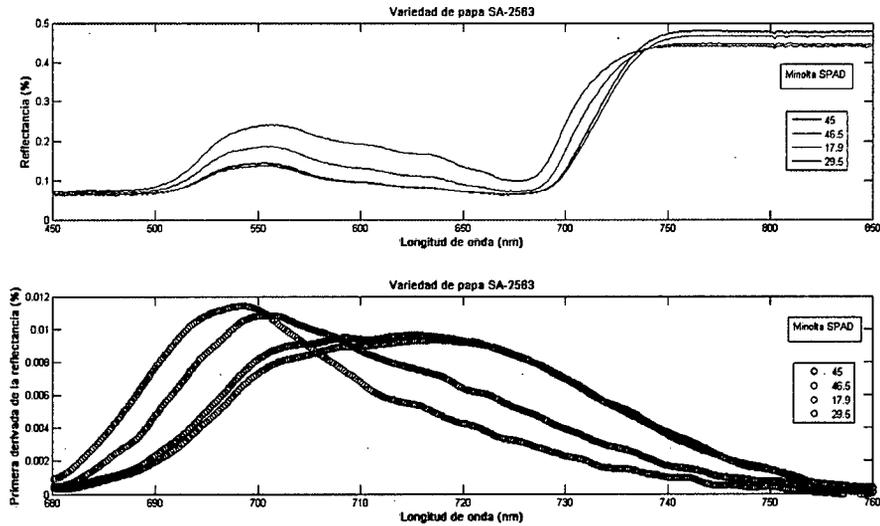


Figura 16. Espectro de R_λ (superior) y PDR_λ (inferior) de la variedad SA-2563 por longitud de onda.

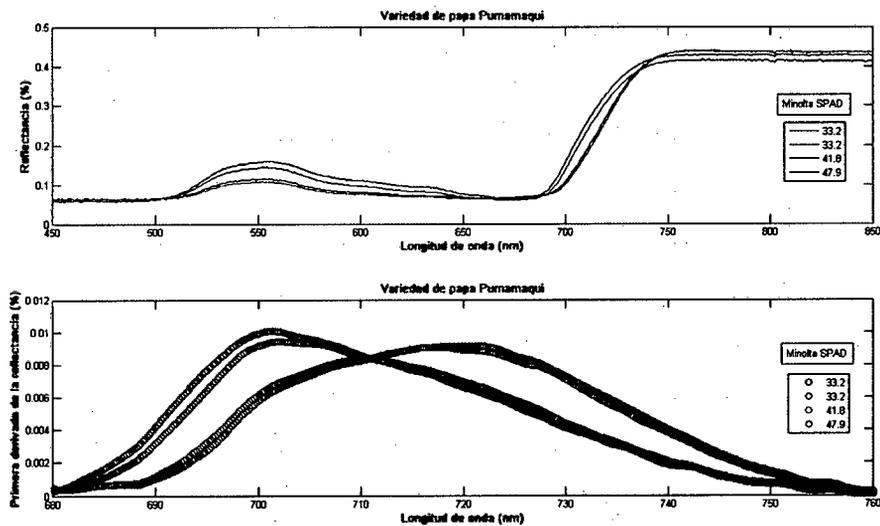


Figura 17. Espectro de R_λ (superior) y PDR_λ (inferior) de la variedad Pumamaqui por longitud de onda.

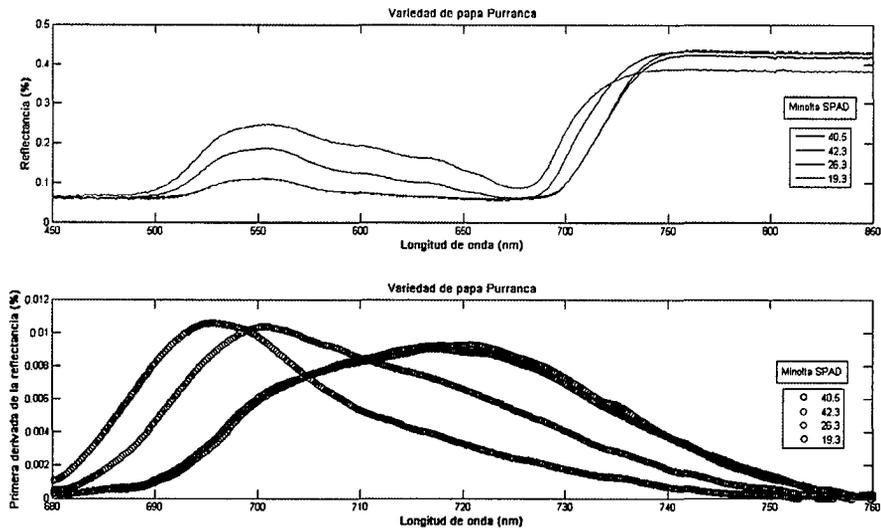


Figura 18. Espectro de R_{λ} (superior) y PDR_{λ} (inferior) de la variedad Purranca por longitud de onda.

La correlación entre la primera derivada de la reflectancia espectral (PDR_{λ}) y la concentración de clorofila A por unidad de área (CL_A), se obtuvo comparando las amplitudes por longitud de onda de la primera derivada de la reflectancia espectral, con los valores SPAD obtenidos para cada uno de las 3 variedades de hojas de papa en el lapso de 4 semanas. Se encontró que la primera derivada de la reflectancia espectral, interpolada según la función b-spline cúbica, y las concentraciones de clorofila A por unidad de área de hoja para cada una de las 3 variedades de papa presentaron una mayor sensibilidad en la región correspondiente al eje rojo, como se puede apreciar en la Figura 19, Figura 21 y Figura 23, y específicamente en la Tabla 2.

Variedad de papa SA-2563

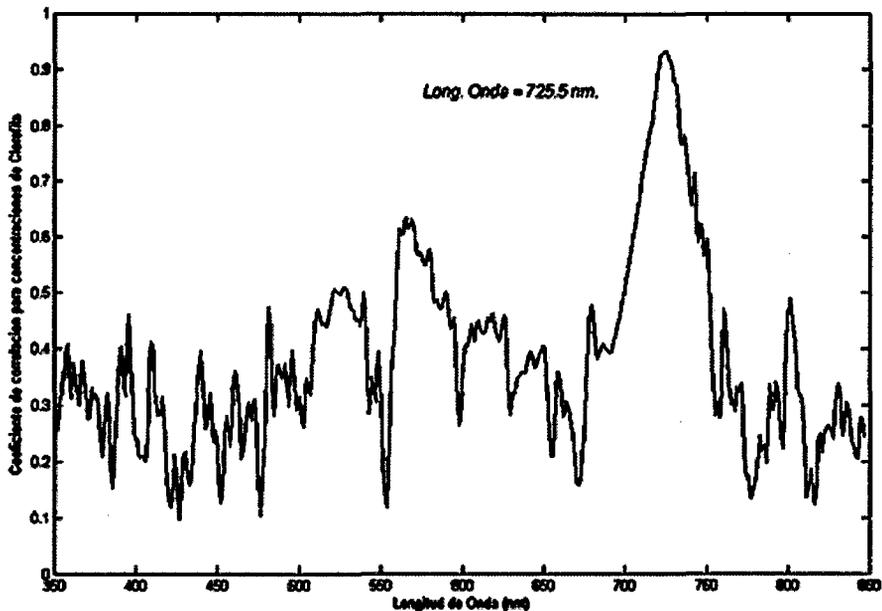


Figura 19. Correlación entre PDR_{λ} y el contenido de CL_A/λ por longitud de onda - variedad SA-2563.

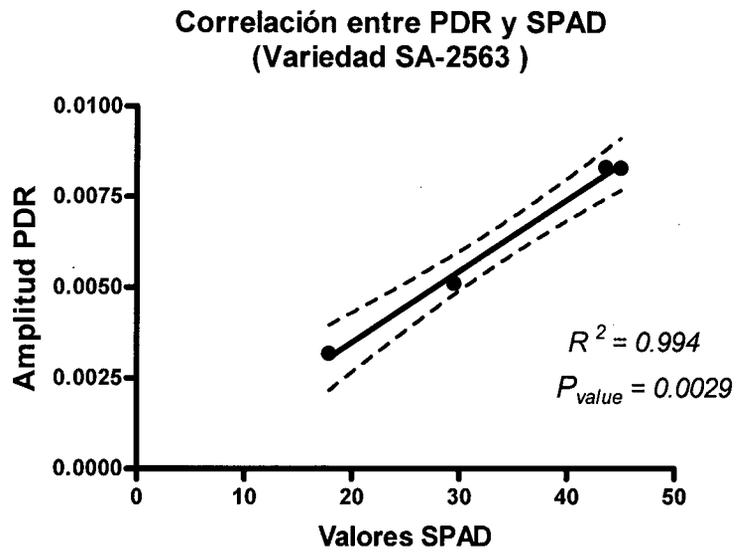


Figura 20. Regresión lineal entre la PDR_{λ} y los valores SPAD variedad SA-2563.

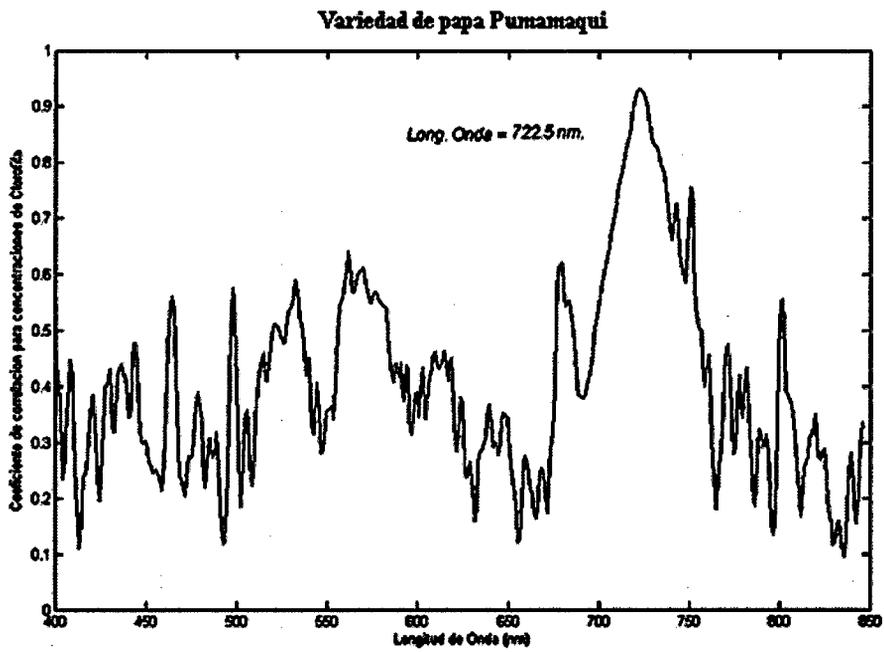


Figura 21. Correlación entre PDR_{λ} y el contenido de CL_A/λ por longitud de onda - variedad Puma Maqui.

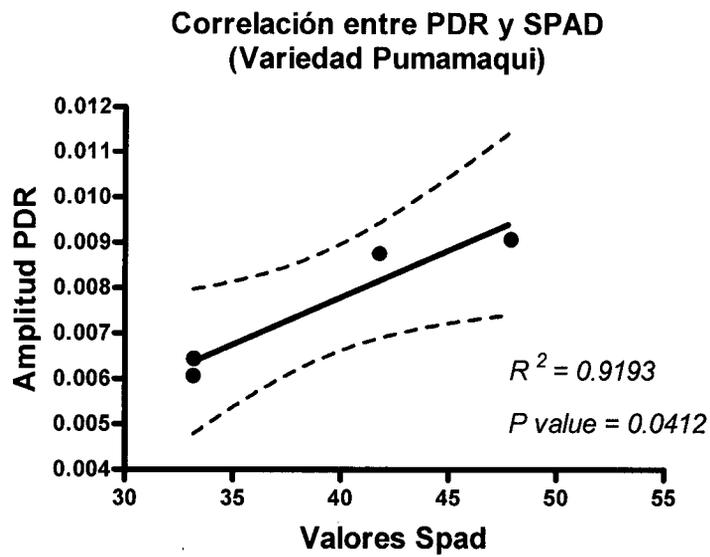


Figura 22. Regresión lineal entre la PDR_λ y los valores SPAD variedad Pumamaqui.

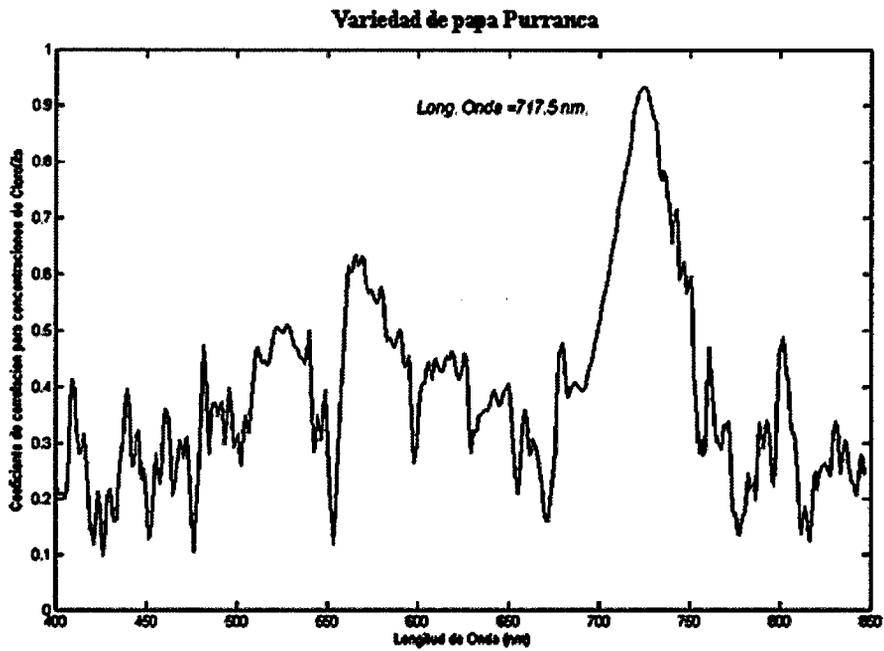


Figura 23. Correlación entre PDR_λ y el contenido de CL_A/λ por longitud de onda - variedad Purranca.

Correlación entre PDR y SPAD (Variedad Purranca)

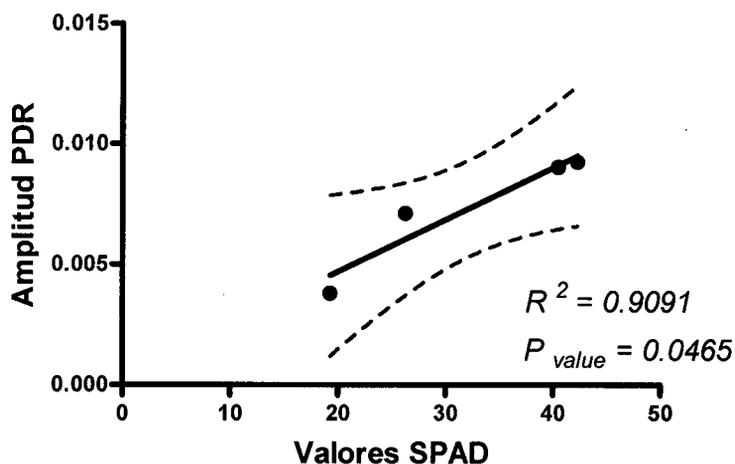


Figura 24. Regresión lineal entre la PDR_{λ} y los valores SPAD variedad Purranca

Tabla 2. Longitudes de onda que presentaron la mayor correlación con las concentraciones de clorofila A por unidad de área con folíolos de 3 variedades de papa.

Variedad	Longitud de onda (nm)	Coefficiente de determinación (R^2)
SA-2563	725.5	99.40%
Pumamaqui	722.5	91.93%
Purranca	717.5	90.91%

Por lo tanto, de los resultados mostrados en la Tabla 2, evaluando la amplitud de la primera derivada de los espectros de reflectancia de hojas de las variedades SA-2563, Pumamaqui y Purranca en las longitudes de onda 725.5, 722.5 y 717.5 respectivamente podemos medir concentraciones relativas de clorofila A por unidad de área.

4.1.6. Conclusiones y discusiones

Trabajos similares como los realizados por Takahiro Endo, *et al.*, 2001, en hojas de Ginkgo biloba y Zelkova Serrata, así como también los estudios realizados en maíz por Shepus *et al.*, 1996 y Dolt *et al.*, 1998, en hojas de eucalipto, encontraron que la primera derivada de los datos de reflectancia de hojas en la región del eje rojo presentan una alta correlación con concentraciones de clorofila en general; estos resultados corroboran los resultados obtenidos en este trabajo, en hojas de papa de las variedades SA-2563, Pumamaqui y Purranca, a partir de la interacción que existe entre la epidermis de la hoja y la luz incidente en la región correspondiente al infrarrojo cercano desde 700 nm a 740 nm.

La reflectancia de plantas, puede permitir que equipos de percepción remota como cámaras, con sensores y filtros en las longitudes de onda adecuadas, montadas en aviones, globos u otro tipo de plataformas, puedan obtener información del estado vegetativo de grandes extensiones de cultivo, de forma rápida y eficiente. Un procesamiento posterior de las imágenes puede ayudar a observar zonas sometidas a algún tipo de agente estresante, como puede resultar deficiencia de agua o nitrógeno,

que se reflejaría con una disminución de las concentraciones de pigmentos como la clorofila A, lo que ayudaría al agricultor para decidir y dirigir sus recursos a zonas localizadas de sus cultivos. Así mismo, evaluaciones periódicas le permitirían observar deficiencias o excesos en el empleo de fertilizantes, lo que le implicaría una reducción de sus gastos, mejorando su producción.

Técnicas no destructivas como la reflectancia, permiten simplificar e integrar información sobre la condición de una planta. Aunque requiere de equipo especializado, hoy en día se ha convertido en una herramienta cada vez más común y frecuente en la agricultura de precisión.

4.2. Relación entre el índice de área foliar LAI y el índice de vegetación diferencial normalizado NDVI.

4.2.1. Introducción

El índice de área foliar es uno de los parámetros biofísicos del cultivo de mayor importancia agronómica. El LAI es el parámetro más influyente en términos de la capacidad de crecimiento de un cultivo y la variación del LAI en el tiempo es un indicador del estado de crecimiento de la cosecha (Maas, 1988a; 1988b; Guisard *et al.*, 2005).

Índice de área foliar(LAI)

El índice de área de hoja acumulativo o índice de área foliar (LAI), es el área de la lámina foliar por unidad de área de tierra. Es un indicador de la capacidad fotosintética del cultivo y está estrechamente relacionado con la producción final. Por tal razón la variabilidad espacio-temporal del LAI en un cultivo es una fuente de información de relevante valor para aplicar criterios de manejo y aplicación de insumos en la agricultura de precisión.

El LAI se calcula tradicionalmente a partir de muestreos destructivos que miden la superficie del follaje (Curran *et al.*, 1992) o de las hojas caídas (Chason *et al.* 1991, Fassnatch *et al.*, 1997). Estos procedimientos resultan ser laboriosos y caros debido a inversión de tiempo y personal.

Medidas indirectas del LAI se pueden basar en relaciones alométricas (cambios de dimensión en las partes corporales correlacionadas con los cambios en el tamaño total) White *et al.*, 1997, en la comparación entre la radiación solar fuera y dentro del bosque (Fassnatch *et al.*, 1994), o en modelos del tipo scaling up, de transferencia de radiación, que son modelos del tipo físico que simulan la reflectancia de la cubierta vegetal a partir de sus propiedades biofísicas.

Índice de vegetación diferencial normalizado(NDVI)

Se puede decir que aproximadamente el 90% de la información relativa a la vegetación está contenida en las bandas rojo e infrarroja de la radiación electromagnética reflejada por las plantas, este es el motivo de porque algunos autores definen los índices de vegetación restringiéndose a combinaciones de estas dos bandas: la roja, fuertemente correlacionada con el contenido de clorofila, y la infrarroja controlada por el LAI y la densidad de vegetación verde (Bannari *et al.*, 1995).

El índice de vegetación normalizado (NDVI), fue propuesto por Rouse *et al.*, (1974). Es una transformación no lineal de la banda visible roja y la infrarroja de la radiación incidente y se define como la diferencia entre la banda cercano infrarrojo (NIR) y la visible (roja) sobre su suma.

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

El NDVI es una medida alternativa de la condición y la cantidad de vegetación. Está asociada con las características vegetales del follaje tales como la biomasa, el índice de área foliar y el porcentaje de cobertura vegetal. El NDVI es el índice más ampliamente utilizado y las razones parecen del tipo prácticas, debido a la simplicidad de su cálculo. El LAI puede ser estimado a partir del NDVI, debido a que el NDVI refleja los cambios estacionales relativos a la vegetación en lugar de la cantidad de vegetación. Hay una relación significativa entre el NDVI y el LAI, asumiendo que la relación NDVI/LAI es lineal (Wiegand C.L. *et al.*, 1979, Tucker *et al.*, 1980, Wardley y Curran *et al.*, 1984); y el valor máximo de NDVI en una estación, corresponde al máximo LAI de cobertura vegetal (Justice *et al.*, 1986).

4.2.2. Materiales

- 90 plantas de papa de la variedad Canchan.
- Cámara agrícola Dycam.
- Medidor de área foliar CID202.

4.2.3. Metodología

Las hojas constituyen el principal órgano en la fotosíntesis, y el cálculo de la PAR interceptada se basa principalmente en su área superficial. Una correcta simulación del LAI en el tiempo, es el primer requerimiento en modelos que simulan el crecimiento de cultivos.

El método propuesto para la calibración local del LAI se basó en comparar los valores de NDVI obtenidos por una cámara agrícola Dycam y el LAI calculado a partir de muestreos destructivos periódicos de la cobertura vegetal de las plantas en estudio. La cámara agrícola Dycam, es una cámara digital portátil diseñada para adquirir imágenes multibandas de las regiones visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético, específicamente las bandas TM3 y 4 extendidas del satélite LANDSAT, lo que permite obtener índices de vegetación como el NDVI, SAVI e IPVI, procesando digitalmente las bandas de cada pixel en las imágenes adquiridas (ver Figura 25).

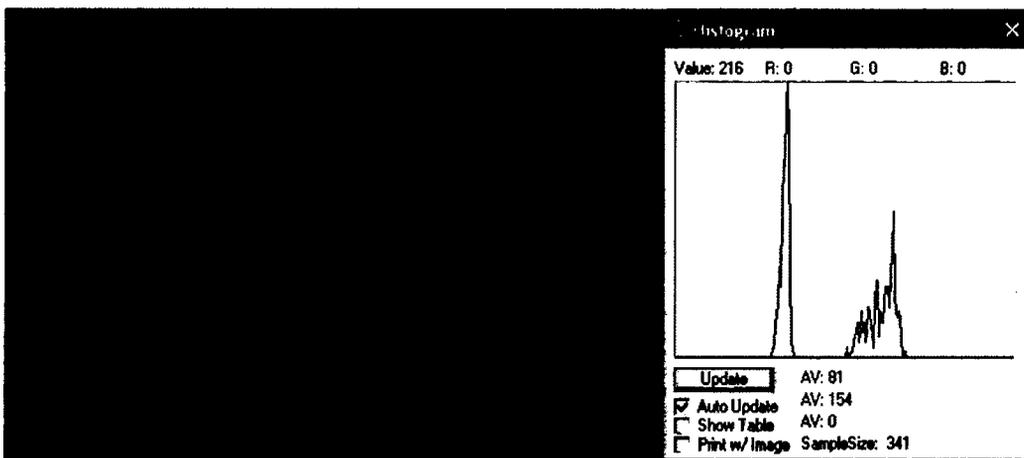


Figura 25. Imagen obtenida por la cámara agrícola Dycam y su respectivo histograma.

El experimento se llevó a cabo en las instalaciones del CIP-Lima a finales de Junio del 2006. Se sembraron 90 repeticiones de plantas de papa de la variedad Canchan y considerando condiciones homogéneas se eligieron 18 plantas al azar de las cuales se recopilaban datos de NDVI utilizando las imágenes multibandas de una cámara agrícola Dycam. Los datos fueron adquiridos con una frecuencia de 10 días aproximadamente resultando un total de 12 muestreos desde la siembra hasta la cosecha.

En paralelo, de las 72 repeticiones restantes, con una frecuencia de 10 días aproximadamente se eligieron 6 plantas al azar las cuales se sometieron a un análisis destructivo para obtener el área de la lámina foliar utilizando el scanner CID202 (ver Figura 26). Se realizó un total de 12 muestreos aunque el último muestreo no se consideró en este ensayo debido a que las plantas se encontraban en una etapa avanzada de senescencia.

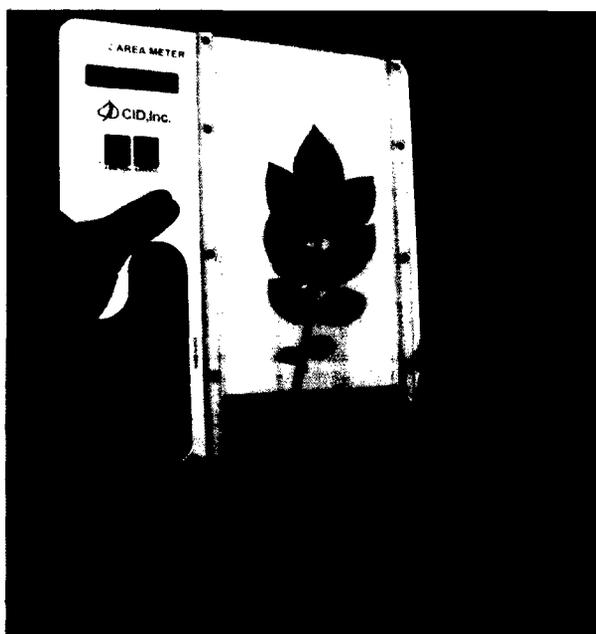


Figura 26. Medidor de área foliar CID202.

Tabla 3. Valores de índice de área foliar (LAI (m²hoja/m²suelo)) para los primeros 11 muestreos destructivos con sus respectivas 6 repeticiones por muestreo.

Muestreos	DDS	1 ^{ra}	2 ^{da}	3 ^{ra}	4 ^{ta}	5 ^{ta}	6 ^{ta}
1	39	1.48	0.97	0.70	1.23	1.24	1.29
2	49	1.57	0.65	1.32	1.25	1.39	1.53
3	62	1.93	2.14	2.41	2.33	2.52	1.73
4	73	3.42	2.26	1.81	1.97	1.91	3.06
5	84	1.46	3.07	3.12	1.74	2.00	2.73
6	94	3.35	3.22	3.55	2.84	2.81	1.68
7	104	2.81	1.70	3.67	2.83	5.84	4.36
8	115	2.07	1.46	3.07	4.06	2.72	4.08
9	125	2.12	0.87	3.04	2.81	2.70	3.50
10	136	4.64	1.97	1.23	2.83	2.86	4.43
11	146	1.26	1.61	3.23	0.55	1.70	3.40

DDS: días después de la siembra.

Tabla 4. Valores de NDVI obtenidos a partir de una cámara Dycam y recopilados de cada uno de los 12 muestreos con 18 repeticiones por muestreo.

	1AGO	11AGO	24AGO	4SET	15SET	25SET	05OCT	16OCT	26OCT	06NOV	16NOV	Cosecha
R	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
1	0.757	0.804	0.765	0.843	0.851	0.922	0.898	0.882	0.812	0.741	0.757	0.765
2	0.569	0.694	0.773	0.867	0.914	0.953	0.890	0.906	0.788	0.773	0.741	0.702
3	0.702	0.741	0.796	0.827	0.882	0.906	0.898	0.914	0.898	0.875	0.906	0.859
4	-----	0.365	0.710	0.851	0.906	0.937	0.929	0.922	0.875	0.804	0.835	0.796
5	-----	0.749	0.694	0.851	0.890	0.922	0.890	0.859	0.812	0.835	0.765	0.725
6	0.349	0.718	0.733	0.851	0.882	0.953	0.890	0.867	0.843	0.859	0.749	0.663
7	-----	0.655	0.749	0.827	0.812	0.922	0.906	0.851	0.796	0.780	0.780	0.733
8	-----	0.631	0.733	0.796	0.898	0.906	0.867	0.875	0.780	0.851	0.843	0.820
9	0.639	0.663	0.749	0.820	0.890	0.937	0.882	0.890	0.843	0.835	0.859	0.804
10	0.412	0.647	0.757	0.812	0.898	0.953	0.906	0.914	0.945	0.898	0.875	0.812
11	-----	0.663	0.757	0.851	0.898	0.953	0.898	0.906	0.827	0.882	0.882	0.804
12	0.631	0.600	0.710	0.812	0.882	0.922	0.906	0.937	0.820	0.906	0.914	0.796
13	0.475	0.694	0.702	0.812	0.875	0.890	0.882	0.820	0.718	0.835	0.757	0.710
14	0.616	0.741	0.757	0.820	0.867	0.937	0.914	0.914	0.827	0.890	0.835	0.804
15	0.686	0.780	0.796	0.812	0.882	0.945	0.898	0.914	0.804	0.875	0.796	0.749
16	0.655	0.710	0.749	0.820	0.875	0.945	0.922	0.882	0.765	0.796	0.827	0.773
17	-----	0.725	0.796	0.827	0.906	0.953	0.906	0.898	0.804	0.882	0.820	0.765
18	0.294	0.631	0.694	0.835	0.906	0.937	0.882	0.890	0.843	0.812	0.780	0.702

M1...M12: Muestreos.

R: Repeticiones.

4.2.4. Análisis y resultados

Aun cuando se asuma una relación lineal entre el NDVI y el LAI, como lo proponen Wiegand C.L. *et al.*, 1979, Tucker *et al.*, 1980, Wardley y Curran *et al.*, 1984, la relación no siempre se conserva lineal debido a que el NDVI se satura para valores de LAI que fluctúan de 2 a 6, dependiendo del tipo de cobertura vegetal y las condiciones ambientales (Clevers *et al.*, 1989; Carlson y Ripley *et al.*, 1997).

Se planteó una ecuación de crecimiento exponencial para derivar LAI a partir de NDVI. Como valor inicial se considero que para un valor de LAI = 0, corresponde un valor de NDVI = 0, que representaría el día de la siembra (ver Figura 27).

Tabla 5. Valores promedio de NDVI y LAI.

Fecha de la evaluación	NDVI	LAI
Siembra	0	0
01 Ago	0.5734	1.1150
11 Ago	0.6901	1.3725
24 Ago	0.7456	2.2025
04 Set	0.8294	2.3000
15 Set	0.8868	2.3850
25 Set	0.9344	3.0550
05 Oct	0.8980	3.4175
16 Oct	0.8928	2.9800
26 Oct	0.8211	2.6675
06 Nov	0.8426	2.8375
16 Nov	0.8166	1.9500

NDVI vs LAI

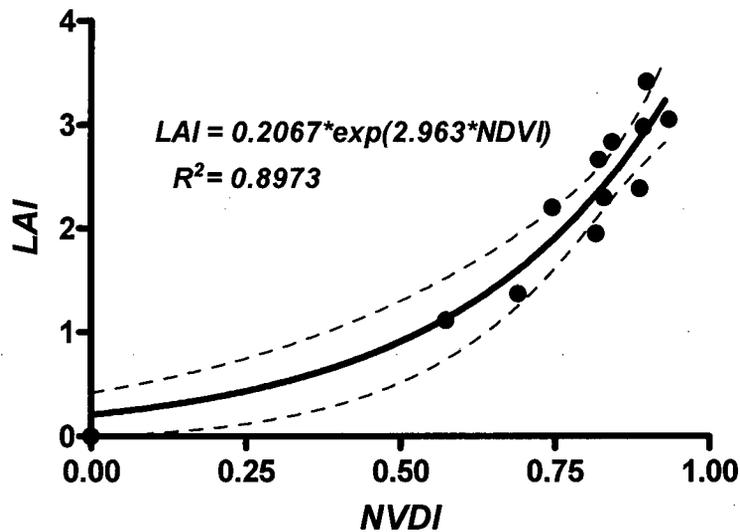


Figura 27. Relación entre LAI y NDVI.

$$LAI = 0.2067 * \exp(2.963 * NDVI) \dots (4.2 - 1)$$

4.2.5. Conclusiones y discusiones

A diferencia de los trabajos realizados por Wiegand C.L. *et al.*, 1979, Tucker *et al.*, 1980 y Wardley y Curran *et al.*, 1984, y a favor de los resultados obtenidos por Clevers *et al.*, 1989, la relación entre el LAI y el NDVI que encontramos durante el ensayo no se ajusta a una regresión lineal tal como se puede apreciar en la Figura 27. Una ecuación de crecimiento exponencial, que se muestra en la ecuación 4.2 - 1, representa con mayor fidelidad la relación entre el LAI y el NDVI. Valores de LAI próximos a 4 corresponden a valores saturados de NDVI, cercanos al valor de 1, como lo menciona Carlson y Ripley *et al.*, 1997.

El LAI es un parámetro muy importante en todo modelo de predicción de fotosíntesis debido a que representa la capacidad de intercepción lumínica de la planta. Aunque tradicionalmente es calculado a partir de muestreos destructivos se ha demostrado en este trabajo que es posible medir indirectamente este parámetro utilizando técnicas de percepción remota que permiten abarcar grandes extensiones de terreno reduciendo costos y tiempo de adquisición.

Debido a que los valores de NDVI representan valores relativos normalizados se requiere realizar para cada variedad ensayos que permita determinar los coeficientes del modelo de crecimiento exponencial que relacione los datos de LAI y NDVI. Se debe tener en cuenta también que los valores de NDVI van a depender de la plataforma que se utilice como por ejemplo puede resultar los valores que podamos obtener desde satélites, aviones, etc., debido a diferencias en la escala y resolución.

4.3. Cálculo de la componente difusa de la PAR utilizando la PAR incidente y el modelo de radiación difusa global de Spitters

4.3.1. Introducción

El estudio de procesos como la fotosíntesis, exige el conocimiento de parámetros biofísico como el LAI, la concentración de pigmentos en las hojas, la fotosíntesis máxima de las hojas, el rendimiento cuántico, etc., y además requiere de parámetros climáticos como la temperatura, la PAR incidente y la variación espacial y temporal de la componente difusa de la PAR incidente. La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre puede definirse como la suma de 3 componentes, una componente directa que incide con un ángulo equivalente al ángulo solar, una componente difusa que se refiere a la radiación que es dispersada por la atmósfera e incide sobre la superficie bajo diferentes ángulos y el albedo que considera la reflectividad de la superficie terrestre. En este trabajo consideramos solo la radiación global y sus componentes directa y difusa, ya que despreciamos la contribución de superficies reflectoras.

Los modelos que simulan procesos como la fotosíntesis de follaje necesitan diferenciar la componente directa y difusa de la radiación solar incidente debido fundamentalmente al mecanismo de interacción que existe entre la luz y la arquitectura del follaje. La zona superior del follaje interceptará las componentes directa y difusa de la luz mientras que el interior del follaje interactuara únicamente con la componente difusa de la radiación incidente. Comúnmente la división entre las componentes difusa y directa es resuelta asumiendo condiciones de cielo claro o nublado y considerando la componente difusa como una constante o una fracción de la luz incidente sobrestimando o subestimando su valor.

Este trabajo presenta ecuaciones que permiten calcular la componente difusa PAR con una escala horaria sobre una superficie horizontal, basándose en las ecuaciones del modelo de radiación difusa global de Spitters, *et al.*, 1986 y parámetros iniciales como la PAR que incide sobre la superficie, la PAR extraterrestre en el tope de la atmósfera, las ecuaciones de Planck del cuerpo negro, la latitud y el tiempo.

4.3.1.1. Irradiancia solar extraterrestre sobre una superficie normal

La irradiancia solar extraterrestre (TSI) se refiere a la cantidad total de energía por unidad de área presente en cada momento fuera de la atmósfera de la tierra y está sujeta a variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio sol. Si conocemos que la tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica, con el sol ubicado en uno de sus focos, la cantidad de radiación solar que llega a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al sol, por lo cual un valor preciso de la distancia tierra-sol es importante. La distancia media tierra-sol (r_0) se denomina unidad astronómica (AU), con 1 AU equivalente a $1.496 \cdot 10^8$ Km. La distancia mínima tierra-sol es alrededor de 0.983 AU, mientras que el máximo es aproximadamente 1.017 AU.

Tradicionalmente la distancia (r), entre la tierra y su trayectoria elíptica alrededor del sol, se expresa mediante una expansión en términos de series de Fourier con un determinado número de coeficientes. Spencer *et al.*, 1971 desarrolló la expresión

(4.3 – 1) con un error de 0.0001, para el recíproco del cuadrado del radio vector de la tierra, denominado factor de corrección de la distancia tierra-sol (ρ^2).

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = (1.000110 + 0.034221\text{Cos}(\Gamma) + 0.001280\text{Sin}(\Gamma) + 0.000719\text{Cos}(2\Gamma) + 0.000077\text{Sin}(2\Gamma))^{-1} \quad \dots (4.3 - 1)$$

En esta ecuación Γ se denomina ángulo diario se representa en radianes y se define mediante la siguiente expresión.

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365}(n - 1)$$

La constante solar (I_{CS}) es el flujo de energía proveniente del sol que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar ubicada a la distancia media de la tierra al sol fuera de toda atmósfera. La organización meteorológica mundial (WMO) define a la constante solar (I_{CS}) como el promedio anual de la TSI y recomienda asignarle el valor de 1367 W/m^2 , valor obtenido mediante consideraciones teóricas relativas a la temperatura del sol y al movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol, con una desviación estándar de 1.6 W/m^2 y una desviación máxima de $\pm 7 \text{ W/m}^2$.

Debido a que la intensidad de la radiación solar varía de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia tierra-sol entonces la radiación solar extraterrestre variara en el transcurso de un año. Por lo tanto a partir de (4.3 – 1) obtenemos:

$$I_n = I_{CS}(1.000110 + 0.034221\text{Cos}(\Gamma) + 0.001280\text{Sin}(\Gamma) + 0.000719\text{Cos}(2\Gamma) + 0.000077\text{Sin}(2\Gamma)) \quad \dots (4.3 - 2)$$

Donde:

I_n : Flujo de radiación extraterrestre sobre en un plano normal a la dirección de propagación.

n : Número del día de un año juliano.

I_{CS} : Constante solar en el rango de 0 a 2500 nm.

4.3.1.2. Irradiancia directa sobre una superficie

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no solo de la irradiancia sino también de la orientación que tenga la superficie con respecto a la dirección de propagación de la radiación. La intensidad de la radiación sobre la superficie dependerá del ángulo θ que forme la normal de la superficie respecto a la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo θ se conoce como el ángulo de incidencia.

$$I_T = I_n \text{Cos}(\theta) \quad \dots (4.3 - 3)$$

En donde I_T se refiere a la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación e I_n se refiere a la irradiancia medida sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación.

Como el sol describe un movimiento aparente a lo largo del día (de oriente a occidente), y otro a lo largo del año (de sur a norte y viceversa), el valor del ángulo θ varía con la fecha y la hora, además de hacerlo con la orientación del plano, su inclinación respecto de la horizontal y la latitud geográfica del lugar donde se encuentre el plano en cuestión. La ecuación que relaciona todas estas variables es la siguiente:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\beta)\cos(\omega) + \cos(\delta)\text{seno}(\phi)\text{seno}(\beta)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \\ & \text{seno}(\delta)\text{seno}(\phi)\cos(\beta) + \cos(\delta)\text{seno}(\beta)\text{seno}(\gamma)\text{seno}(\omega) - \\ & \text{seno}(\delta)\cos(\phi)\text{seno}(\beta)\cos(\gamma) \end{aligned}$$

... (4.3 - 4)

Donde:

ϕ : Latitud geográfica, esto es, la posición angular del lugar donde se encuentra el plano en cuestión con respecto al ecuador terrestre, positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur:

$$-90 \leq \phi \leq 90$$

δ : Declinación solar, es la posición angular del sol al medio día solar, respecto del plano del ecuador, positivo hacia el norte. La declinación solar es cero el día que comienza la primavera y el día que comienza el otoño (Equinoccios). En estos días el sol se encuentra en el ecuador celeste, que es la extrapolación del ecuador terrestre en la bóveda celeste. La declinación es máxima en el solsticio de verano ($23^\circ 27'$) y mínima en el solsticio de invierno ($-23^\circ 27'$). La expresión más importante y más ampliamente citada en la literatura solar corresponde a la de Spencer *et al.*, 1971, quien presenta la siguiente expresión para calcular δ en radianes:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912\cos(\psi) + 0.070257\text{seno}(\psi) - 0.006758\cos(2\psi) + \\ & 0.000907\text{seno}(2\psi) - 0.002697\cos(3\psi) + 0.00148\text{seno}(3\psi) \end{aligned}$$

... (4.3 - 5)

Donde:

$$\psi = 2n\pi/365.$$

n : Día del año juliano.

β : Pendiente del plano sobre el cual incide la radiación o su inclinación respecto de la horizontal.

γ : Acimut de la superficie. Angulo que forma la normal a la superficie respecto del meridiano local. Se considera que $\gamma = 0$ corresponde al sur, valores negativos hacia el este y hacia el oeste positivo.

ω : Angulo horario. Desplazamiento angular del sol al este o al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra a la velocidad angular de 15° por hora (360° en 24 horas), negativo por la mañana y positivo por la tarde.

Para una superficie horizontal, es decir con $\beta = 0$, la ecuación (4.3 – 4) se reduce a:

$$\text{Cos}(\theta_z) = (\text{seno}(\phi) \cos(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)) \quad \dots(4.3 - 6)$$

En donde θ_z representa el ángulo de la posición del sol respecto de la vertical, que se conoce como ángulo cenital.

Por lo tanto la irradiancia en el tope de la atmosfera sobre una superficie horizontal (I_0) se define según la expresión (4.3 – 8) y podemos apreciar un ejemplo de la simulación de I_0 en la Figura 28:

$$I_0 = I_{CS}(1.000110 + 0.034221\text{Cos}(\Gamma) + 0.001280\text{Sin}(\Gamma) + 0.000719\text{Cos}(2\Gamma) + 0.000077\text{Sin}(2\Gamma))\text{Cos}(\theta_z) \quad \dots(4.3 - 7)$$

$$I_0 = I_{CS}(1.000110 + 0.034221\text{Cos}(\Gamma) + 0.001280\text{Sin}(\Gamma) + 0.000719\text{Cos}(2\Gamma) + 0.000077\text{Sin}(2\Gamma))(\text{seno}(\phi) \cos(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)) \quad \dots(4.3 - 8)$$

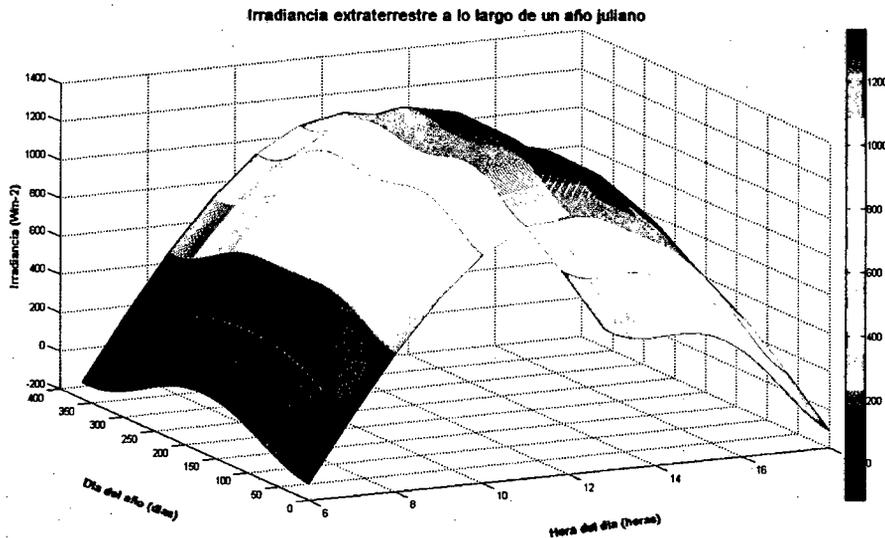


Figura 28. Irradiancia solar extraterrestre a lo largo de un año juliano - latitud 12° S.

4.3.1.3. PAR extraterrestre según el modelo de Planck

El término PAR extraterrestre se refiere en este caso a la irradiancia que recibiría la superficie terrestre en ausencia de atmosfera en el rango de longitudes de onda comprendida entre 400 y 700 nm.

La densidad de estados permitidos (dE_f) en cada intervalo de frecuencias de un cuerpo negro, simulada para una cavidad tridimensional de paredes metálicas cuyas paredes han sido calentadas uniformemente a una temperatura T, lo estudiamos en el capítulo 2 y se define como:

$$dE_f(f) = \frac{8\pi f^2 \bar{E}(f)}{c^3} df \quad \dots(4.3 - 9)$$

La densidad de energías del espectro de un cuerpo negro de una cavidad a una temperatura T es el número de ondas estacionarias en el intervalo de frecuencias multiplicado por la energía promedio de las ondas y dividido entre el volumen de la cavidad y nos proporciona el contenido de energía promedio por unidad de volumen en el intervalo de frecuencias entre f y f + df.

Según Planck, considerando la energía como si fuera una variable discreta en lugar de una variable continua, y según la mecánica cuántica:

$$\bar{E}(f) = \frac{hf}{e^{(hf/kT)} - 1} \quad \dots (4.3 - 10)$$

Por lo tanto, reemplazando (4.3 - 9) en (4.3 - 10) obtenemos:

$$dE_f(f) = \frac{8\pi f^2}{c^3} \left(\frac{hf}{e^{(hf/kT)} - 1} \right) df$$

$$\frac{dE_f(f)}{df} = \left(\frac{8\pi h}{c^3} \right) \left(\frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \right) \quad \dots (4.3 - 11)$$

Si realizamos un cambio de variable:

$$f = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

$$\frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \left(\frac{dE}{df} \right) \left(\frac{df}{d\lambda} \right) = \left(\frac{8\pi hc}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \right) \quad \dots (4.3 - 12)$$

$$\Rightarrow \frac{dE_\lambda}{d\lambda} = \left(\frac{8\pi hc}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad \dots (4.3 - 13)$$

La intensidad, energía por unidad de área y por unidad de tiempo, para una longitud de onda λ , de un cuerpo negro a la temperatura T, se define como:

$$\frac{dW_\lambda}{d\lambda} = \left(\frac{c}{4} \right) \left(\frac{dE_\lambda}{d\lambda} \right) = \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad \dots (4.3 - 14)$$

Donde:

$k = 1.38 * 10^{-23} J/K^\circ$, constante de Boltzman
 $h = 6.62 * 10^{-34} J/s$, constante de planck
 $c = 3 * 10^8 m/s$, velocidad de la luz en el vacío

Sea:

$$x = \frac{hc}{\lambda kT}$$

La irradiancia emitida por un cuerpo negro para todo el rango de longitudes de onda se obtiene integrando la ecuación (4.3 - 14) desde $\lambda = 0$ hasta $\lambda = \infty$.

$$W_T = \int_0^{\infty} dW_\lambda = \left(\frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \right) \int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15c^2 h^3} \quad \dots (4.3 - 15)$$

$$W_T = \sigma T^4$$

Donde:

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ k}^{-4}, \text{ constante de Stefan - Boltzman}$$

Ahora, la fracción de intensidad emitida por un cuerpo negro en la región PAR del espectro ($F(x_1, x_2)$) se obtiene dividiendo la intensidad emitida en dicha región entre la intensidad emitida en todo el rango de longitudes de onda que se obtuvo en la ecuación (4.3 - 15).

La intensidad emitida por un cuerpo negro en la región PAR, se define como:

$$W(f_1, f_2) = \left(\frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \right) \int_{x_1}^{x_2} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

Por lo tanto:

$$F(x_1, x_2) = \frac{W(f_1, f_2)}{W_T} \quad \dots (4.3 - 16)$$

Entonces $F(x_1, x_2)$ se define como:

$$F(x_1, x_2) = \left(-\frac{15}{\pi^4} \right) \int_{x_1}^{x_2} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad \dots (4.3 - 17)$$

Para realizar el cálculo de la integral definida de $F(x_1, x_2)$, haremos uso de la siguiente aproximación:

Consideremos $F(x)$ igual a:

$$F(x) = \left(\frac{15}{\pi^4} \right) \int_x^{\infty} \frac{x^3 e^{-x}}{(1 - e^{-x})} dx$$

Según Taylor:

$$f(x_0 + h) \approx f(x_0) + f'(x_0) + \frac{f''(x_0)h^2}{2} \quad \dots (4.3 - 18)$$

$$(1 - e^{-x})^{-1} = 1 + e^{-x} + e^{-2x} + e^{-3x} + \dots \quad \dots (4.3 - 19)$$

$$F(x) = \left(\frac{15}{\pi^4}\right) \int_x^{\infty} x^3 e^{-x} (1 + e^{-x} + e^{-2x} + \dots) dx \quad \dots (4.3 - 20)$$

$$F(x) = \left(\frac{15}{\pi^4}\right) \int_x^{\infty} (x^3 e^{-x} + x^3 e^{-2x} + x^3 e^{-3x}) dx \quad \dots (4.3 - 21)$$

Integrando por partes, obtenemos que:

$$\int_x^{\infty} x^3 e^{-nx} dx \Rightarrow u = x^3 \wedge dv = e^{-nx} dx$$

$$\int_x^{\infty} x^3 e^{-nx} dx = \frac{x^3 e^{-nx}}{n} + \frac{3x^2 e^{-nx}}{n^2} + \frac{6}{n^2} \int_x^{\infty} x e^{-nx} dx \quad \dots (4.3 - 22)$$

$$\int_x^{\infty} x^3 e^{-nx} dx = \frac{e^{-nx}}{n} \left(x^3 + \frac{3x^2}{n} + \frac{6x}{n^2} + \frac{6}{n^3} \right) \quad \dots (4.3 - 23)$$

Remplazando (4.3 - 23) en (4.3 - 21), obtenemos que:

$$F(x) = \frac{15}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-nx}}{n} \left(x^3 + \frac{3x^2}{n} + \frac{6x}{n^2} + \frac{6}{n^3} \right) \quad \dots (4.3 - 24)$$

Por lo tanto, la intensidad emitida por un cuerpo negro en la región PAR resulta:

$$I = (F(x_1) - F(x_2)) W_T$$

$$I = (F(x_1) - F(x_2)) \sigma T^4, \quad \text{con } [I] = W m^{-2} \quad \dots (4.3 - 25)$$

Considerando:

$$x_1 = \frac{hc}{\lambda_1 kT} \wedge x_2 = \frac{hc}{\lambda_2 kT}$$

Con:

$$\lambda_1 = 700 \text{ nm} \wedge \lambda_2 = 400 \text{ nm}$$

$$I_{PAR-Extra} = (F(x_{700}) - F(x_{400})) \sigma T^4 \wedge [I_{PAR-Extra}] = W m^{-2} \quad \dots (4.3 - 26)$$

La irradiancia PAR extraterrestre sobre una superficie horizontal (I_{0-PAR}) se obtiene remplazando la constante solar PAR extraterrestre (4.3 - 26) en (4.3 - 7):

$$I_{0-PAR} = I_{PAR-EXTRA} (1.000110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.001280 \text{seno}(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \text{seno}(2\Gamma)) (\text{seno}(\phi) \cos(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega))$$

Donde:

$$\psi = 2\pi n / 365$$

n = Día del año juliano

ϕ : Latitud geográfica.

δ : Declinación solar

ω : Angulo horario

Las simulaciones de PAR extraterrestre en el transcurso de un día y a lo largo de un año juliano a una latitud de 12° sur se pueden apreciar en la Figura 29 y en la Figura 30 respectivamente.

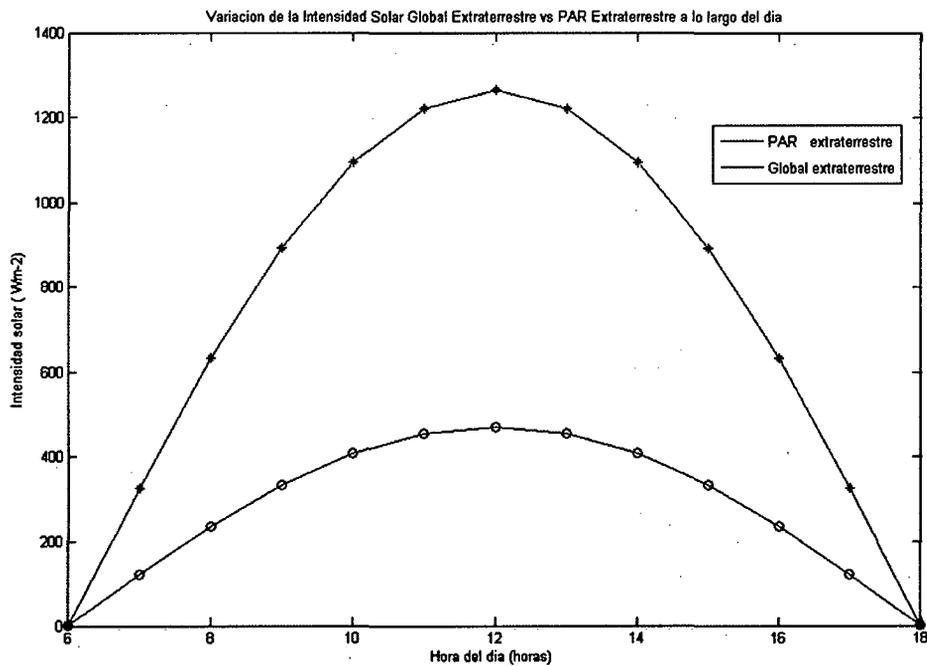


Figura 29. I_{0-PAR} vs I_0 del día 200 de un año juliano - latitud 12° S.

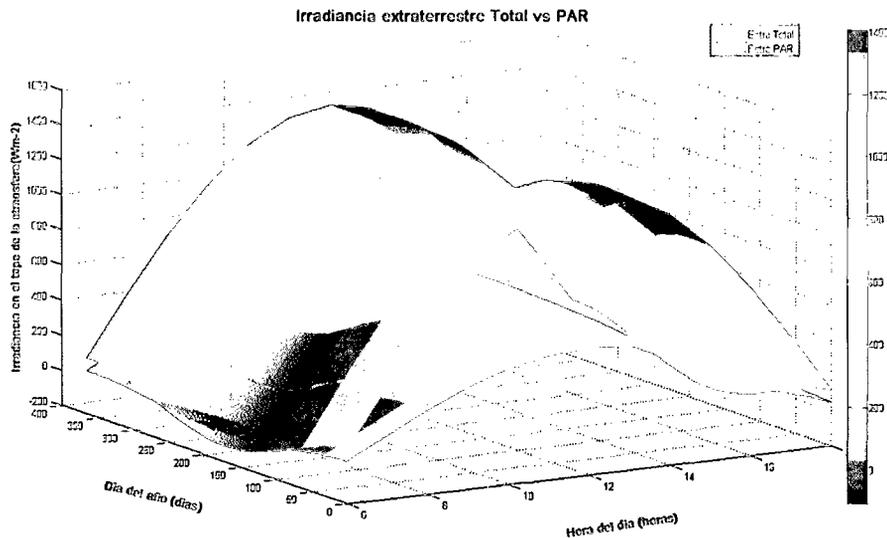


Figura 30. I_0 vs $I_{0- PAR}$ a lo largo de un año juliano- latitud 12° S.

4.3.1.4. Componente difusa de la PAR y el modelo de radiación difusa global de Spitters.

La luz solar es absorbida o reflejada con mayor intensidad en la región visible del espectro electromagnético incidente, región que abarca desde 400 hasta 700 nm. Este hecho determina que la irradiancia correspondiente a la región PAR represente con mayor exactitud las variaciones de la irradiancia global con respecto al resto del espectro electromagnético incidente. Por este motivo es razonable considerar una relación lineal entre la PAR y la radiación solar global (Campbell y Morman *et al.*, 1998), además es común considerar que la PAR constituye en promedio el 50% de la radiación global incidente (Tiba, C. e Leal, S. *et al.*, 2004 y Grossi Gallegos, H. *et al.*, 2003).

Por otro lado, las ecuaciones del cuerpo negro definidos por Planck demuestran que tanto la irradiancia global como la PAR en el tope de la atmósfera dependen únicamente de la temperatura, ecuaciones definidas en (4.3 – 15) y (4.3 – 25) respectivamente.

Por lo expuesto, y teniendo conocimiento que el modelo de Spitters *et al.*, 1986 calcula la componente difusa de la irradiancia global, utilizando datos de irradiación global incidente y la irradiación global extraterrestre, se planteó realizar consideraciones al modelo original de tal forma que nos permitan calcular la componente difusa de la PAR incidente (I_{PAR-df}).

Por lo tanto, a partir de las consideraciones realizadas por De Jong *et al.*, 1980 (p. 55), la relación entre la componente difusa de la PAR y la PAR incidente (I_{PAR-df}/I_{PAR}) y el coeficiente de transmisión definido por la PAR incidente con respecto a la PAR extraterrestre (I_{PAR}/I_{0-PAR}), tomando en cuenta valores de radiación horaria, se calcularon según:

$$I_{PAR-df}/I_{PAR} = 1$$

$$\text{para: } I_{PAR}/I_{0-PAR} \leq 0.22$$

$$I_{PAR-df}/I_{PAR} = 1 - 6.4(I_{PAR}/I_{0-PAR} - 0.22)^2 \quad \text{para: } 0.22 < I_{PAR}/I_{0-PAR} \leq 0.35$$

$$I_{PAR-df}/I_{PAR} = 1.47 - 1.66 I_{PAR}/I_{0-PAR} \quad \text{para: } 0.35 < I_{PAR}/I_{0-PAR} \leq k$$

$$I_{PAR-df}/I_{PAR} = R \quad \text{para: } k < I_{PAR}/I_{0-PAR}$$

$$\text{Con: } R = 0.847 - 1.61(\text{seno}(\theta_z)) + 1.04(\text{seno}^2(\theta_z)) \quad \text{y } k = (1.47 - R)/1.66$$

Donde:

I_{PAR-df} : Componente difusa de la PAR.

I_{PAR} : PAR incidente.

I_{0-PAR} : PAR en el tope de la atmósfera sobre un plano paralelo a la superficie de la tierra.

k, R : Parámetros utilizados en la regresión de la componente difusa PAR.

θ_z : Ángulo que representa la posición del sol respecto a la vertical (ángulo cenital).

Un ejemplo de la simulación del modelo de PAR difusa, explicado línea arriba, se observa en la Figura 31 y además de las comparaciones nos permite apreciar que la PAR incidente es predominantemente difusa al atardecer debido a que el ángulo solar presenta su mayor inclinación con respecto al zenit.

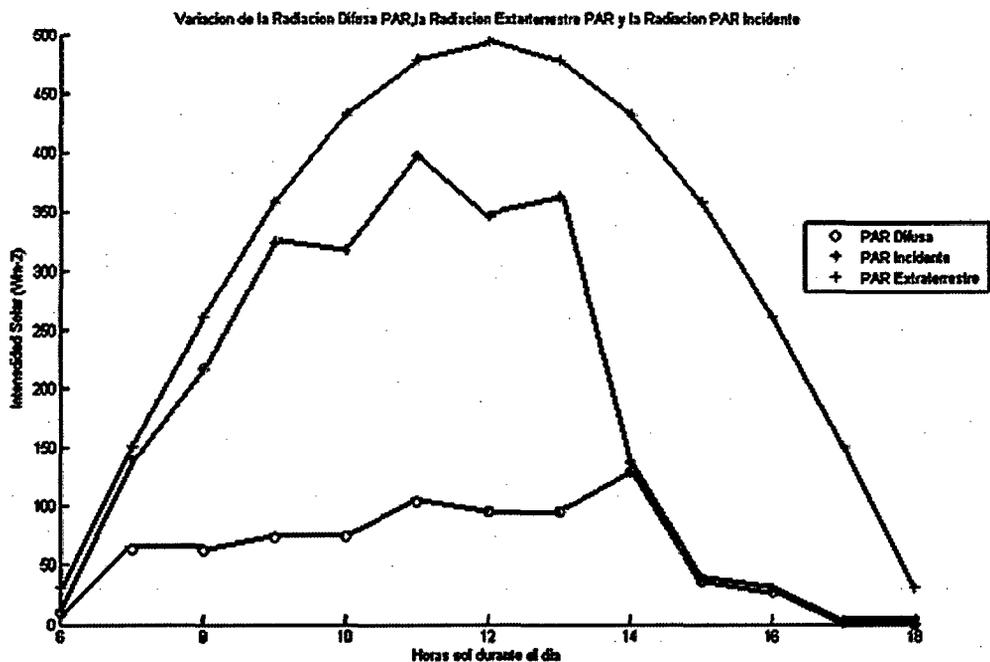


Figura 31. I_{0-PAR} , I_{PAR} e I_{PAR-df} 2/10/07 - latitud $12^{\circ}4'35''$ S.

4.3.2. Materiales

- Espectroradiómetro ASD FieldSpec VNIR (325-1075 nm).
- Soporte con banda de polietileno negro.

4.3.3. Metodología

El ensayo se llevó a cabo en las instalaciones del Centro Internacional de la Papa, (CIP) en Lima, Perú (latitud: 12°4'35'' S y longitud: 76°56'51'' O), entre los meses de agosto y octubre del 2007.

Los datos de irradiancia se adquirieron utilizando el espectroradiómetro ASD FieldSpec VNIR, equipo que posee un rango de trabajo que abarca desde 325 hasta 1075 nanómetros de longitud de onda. El FieldSpec es un espectroradiómetro altamente portátil útil en múltiples aplicaciones que requieran medidas de luz absoluta o relativa. Al interior del instrumento la luz es proyectada desde una fibra óptica hacia una rejilla de difracción holográfica donde las longitudes de onda, componentes de la luz, son separadas y reflejadas hacia un fotodiodo, detector de silicio con 512 canales, cada uno de ellos independiente y geoméricamente posicionado para recibir la luz en un ancho de banda nominal de 1.6 nm. El detector de silicio convierte los fotones incidentes en electrones, la corriente fotoeléctrica de cada elemento del detector es convertida en voltaje y luego digitalizada por un convertidor analógico digital de 16 bits. Finalmente, los datos digitales son luego transferidos al computador por medio de una interface USB. Además, para obtener datos que se aproximen con mayor precisión a la radiación solar incidente sobre una superficie plana, se requiere de un receptor de corrección coseno. Este dispositivo se conecta mediante una fibra óptica al ASD y permite al sensor del FieldSpec VNIR medir la densidad de flujo por unidad de área según la ley de coseno de Lambert.

Para validar el modelo se requirió filtrar la componente directa de la PAR que incide sobre el sensor de corrección coseno del ASD. Para este fin se utilizó una banda de polietileno negro recubierto con negro de humo de 5 cm de ancho, instalada de tal manera que sombreara constantemente al sensor remoto del receptor de corrección coseno, como se puede apreciar en la Figura 32.

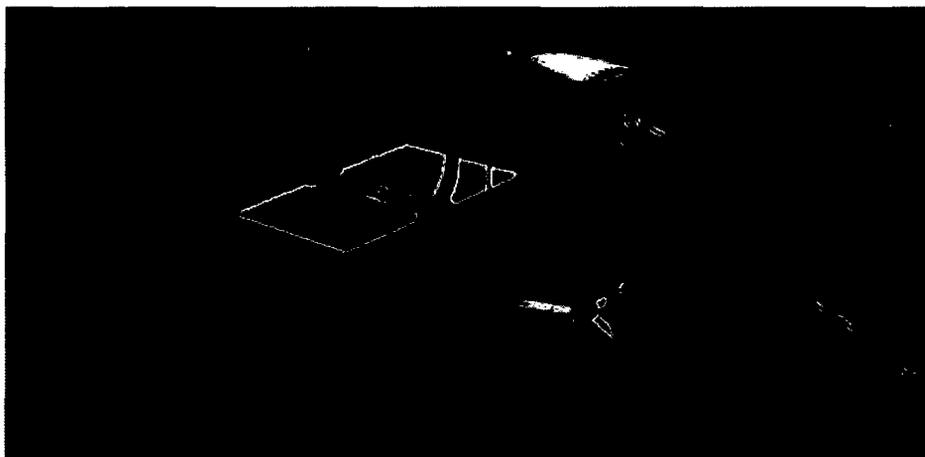


Figura 32. ASD FieldSpec VNIR recopilando datos de irradiancia difusa.

Los datos de irradiancia PAR difusa se adquirieron con la frecuencia de 1 hora, desde las 9 de la mañana hasta las 4 de la tarde, en condiciones de cielo despejado, cielo parcialmente nublado y cielo completamente nublado.

4.3.4. Análisis y resultados

Los datos observados de la componente difusa PAR, medidos con el espectroradiómetro ASD FieldSpec Handheld, y los datos simulados, obtenidos a partir del modelo, se compararon a partir de una regresión lineal. Se estudiaron tres condiciones climáticas: 1) cielo despejado; 2) cielo parcialmente nublado y 3) cielo completamente nublado y los resultados se pueden apreciar en la Figura 33, Figura 34 y respectivamente. Adicionalmente se calculó el coeficiente de determinación (R^2) y el P value para cada uno de los casos, encontrándose una aceptable correlación y valores significativos del P value respectivamente. No está de más precisar que el P value es una probabilidad que se puede definir como el menor nivel de significación al que se puede rechazar una hipótesis nula cuando es verdadera.

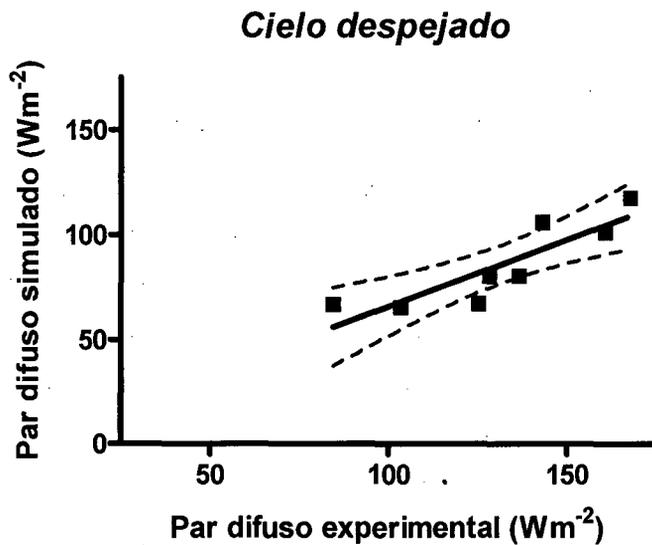


Figura 33. Cielo despejado 2-10-07 CIP-LIMA- latitud 12.08°S.

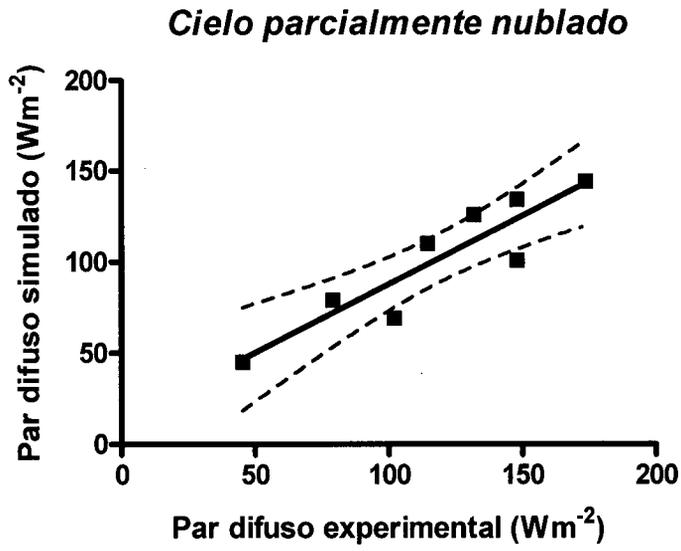


Figura 34. Cielo nublado – despejado 4-10-07 CIP-LIMA - latitud 12.08°S.

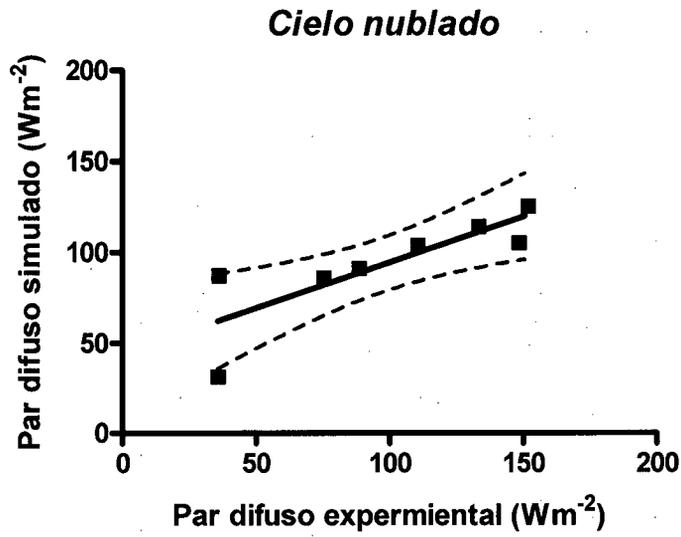


Figura 35. Cielo completamente nublado 17/08/07 CIP-LIMA - latitud 12.08°S.

Tabla 6. Ecuaciones de regresión y correlaciones de datos de PAR difusa simulado y observado para un cielo despejado, parcialmente nublado y nublado.

	<i>Cielo despejado</i>	<i>Cielo parcialmente nublado</i>	<i>Cielo nublado</i>
<i>Pendiente</i>	0.6376 ± 0.1437	0.5016 ± 0.1411	0.7507 ± 0.1405
<i>Intercepto en Y</i>	2.040 ± 19.21	44.29 ± 15.07	12.71 ± 17.44
<i>Intercepto en X</i>	-3.199	-88.30	-16.93
R^2	0.7665	0.6779	0.8263
<i>P value</i>	*	*	*

*: Significativo

4.3.5. Conclusiones y discusiones

Este trabajo es un complemento del modelo de Spitters *et al.*, 1986 y permite calcular la componente difusa PAR en una escala horaria a partir de datos de PAR incidente, PAR extraterrestre, latitud y hora.

Considerar la fracción de radiación difusa como una constante es una subestimación o sobrestimación, según sea el caso, que no se ajusta a la realidad ya que al igual que la radiación incidente total la radiación difusa presenta un comportamiento sinusoidal que varía según las condiciones ambientales, la posición del sol y la intensidad solar incidente.

Los datos simulados explicaron al menos el 68% de la variancia medida. La mejor correlación se presentó para condiciones de cielo nublado, mientras que para cielos con condiciones de nubosidad variable, se presentó una reducción en la eficiencia debido a la variabilidad de la intensidad solar incidente durante la adquisición de datos.

Las relaciones para los tres casos, tendieron a ser paralelas, pendientes semejantes, pero el factor de escalamiento (intercepto Y) varió con el grado de nubosidad.

Aunque el modelo está basado en la experiencia los resultados obtenidos son aceptables y presenta la ventaja de que no requiere gran cantidad de parámetros iniciales y excesivo cálculo computacional. Se desarrolló con el objetivo de mejorar la eficiencia de modelos que estudian la fotosíntesis o la biomasa de plantas y que consideran la interacción entre la PAR incidente y los diferentes estratos de la planta.

Capítulo 5.

Validación del modelo de biomasa neta en plantas de papa de la variedad Canchan y aplicaciones del modelo.

5.1. Introducción

En algún punto en el desarrollo de un modelo, la predicción de un modelo tiene que ser comparada con observaciones desde un sistema real junto con una valoración del desempeño del modelo (Amthor y Loomis 1996). Aunque el objetivo de este capítulo es mostrar la capacidad de predicción del modelo, es importante señalar que el concepto de validación ha sido fuertemente criticado por Oreskes *et al.*, 1994 debido a que es filosóficamente imposible probar que un modelo es verdadero o correcto.

La producción de materia seca y el contenido de materia seca de las plantas son el resultado de la fotosíntesis y la respiración. Esto ocurre en las hojas, lugar donde la energía solar es transformada en energía de enlaces químicos y finalmente acumulada en fotosintatos. La fotosíntesis es el proceso central de los modelos de simulación que estiman el crecimiento y productividad de todas las plantas (Keulen *et al.*, 1982; Ritchie *et al.*, 1995). Por lo tanto, usando como base los modelos de fotosíntesis de follaje y respiración autotrófica descritos en el capítulo 3, junto con las técnicas de percepción remota aplicadas a la cuantificación de parámetros biofísicos descritos en el capítulo 4 y considerando parámetros fisiológicos como la fotosíntesis máxima saturada por luz (P_{max}), la eficiencia fotosintética (α), etc., obtenidos a partir de tablas y o referencias bibliográficas se integraron para desarrollar un modelo, elaborado en lenguaje de programación MATLAB, que permitió simular la biomasa generada por plantas del tipo C3 como la papa durante su periodo vegetativo, desde el momento que se sembró hasta su cosecha.

Se realizó un ensayo experimental en junio del 2006 al interior de una cámara de crecimiento, ver Figura 36, en las instalaciones del CIP-Lima ubicado a $12^{\circ} 4' 39''$ de latitud sur y $76^{\circ} 56' 53''$ de longitud oeste. Se sembró un número determinado de repeticiones por variedad de papa y considerando condiciones homogéneas se realizaron periódicamente muestreos destructivos de un número pre-establecido de plantas seleccionadas al azar, con una frecuencia de 20 días aproximadamente, con el objetivo de calcular el área foliar y la cantidad de materia seca acumulada desde la siembra hasta la fecha del muestreo. En paralelo se recopilaban datos climáticos horarios de PAR incidente y temperatura, por intermedio de una estación meteorológica Davis ubicada al interior del invernadero, mientras que los datos de percepción remota pasiva y activa se adquirieron periódicamente utilizando un espectroradiómetro ASD VNIR, una cámara agrícola Dycam y un clorofilómetro Minolta SPAD-502.



Figura 36. Interior de la cámara de crecimiento experimental.

5.2. Materiales y métodos

Se utilizaron los siguientes equipos durante el ensayo:

- 1 Estación meteorológica Davis.
- 1 Cámara agrícola Dycam.
- 1 Medidor de área foliar CID202.
- 1 Espectroradiómetro ASDI VNIR (350-1100 nm).
- 1 Clorofilómetro Minolta SPAD-502.
- 1 Balanza electrónica Daigger DP-5000.

Este ensayo tuvo lugar en las instalaciones del CIP-LIMA al interior del invernadero experimental de la división 5 del CIP y su particular diseño permitió controlar factores abióticos como la temperatura, la humedad relativa y factores bióticos como la presencia de plagas o enfermedades. El experimento tuvo inicio el 23 de Junio del 2006 y culminó el 20 de Noviembre del mismo año y consistió en sembrar 78 repeticiones de la variedad de papa Canchan de las cuales se eligieron 18 repeticiones al azar las cuales fueron objeto de evaluaciones periódicas no destructivas de parámetros espectrales tales como el índice de vegetación normalizado (NDVI), espectros de reflectancia (% R) y valores SPAD que fueron recopilados a partir de una cámara agrícola Dycam, un espectroradiómetro ASD VNIR (350 1075 nm) y un clorofilómetro Minolta SPAD-502 respectivamente, mientras que las plantas restantes se sometieron a un muestro destructivo periódico con el objetivo de determinar el índice de área foliar (LAI) y la

materia seca acumulada por intermedio de un escáner y una balanza electrónica respectivamente resultando un total de 10 muestreos y en cada muestreo se evaluaron 6 repeticiones. Es importante señalar que todas las plantas fueron sembradas en la misma fecha y se consideraron condiciones homogéneas durante el ensayo.

Las evaluaciones de parámetros espectrales fueron realizadas en paralelo con los muestreos destructivos resultando evidentemente un total de 10 evaluaciones, y se consideró la media de las 18 evaluaciones realizadas por cada muestreo como el valor representativo de cada parámetro espectral.

Las concentraciones relativas de clorofila fueron uno de los más importantes parámetros espectrales evaluados durante este ensayo. Ya que el ensayo tuvo lugar al interior de un invernadero, lo que permitió trabajar en condiciones controladas, con un área sembrada aproximada de 12 m² y un número reducido de plantas a evaluar se optó por medir clorofila utilizando el clorofilómetro Minolta SPAD-502, ver Anexo 2. En caso de que el ensayo hubiese tenido lugar en campo abierto, con una superficie sembrada en el orden de las hectáreas, hubiese sido necesario dejar de lado el Minolta SPAD-502 y medir clorofila a partir de fotografías aéreas con filtros en la región del eje rojo como se estudió en el capítulo 4.1.

Los valores estimados periódicamente por el Minolta SPAD-502 representan la dinámica de la concentración de clorofila A en las hojas de papa. La clorofila A es el pigmento más abundante en las plantas y es el aparato receptor encargado de coleccionar luz, por lo tanto está vinculado directamente con el porcentaje de transmitancia de luz PAR (m) a través de las hojas. Es decir, una elevada concentración de clorofila A en la hoja implicaría una menor transmitancia de luz a través de ella y viceversa. Para cada una de las 18 repeticiones, se eligieron 6 hojas al azar tanto del medio como del tercio superior de la planta, y se consideró el promedio de 3 medidas como el valor representativo por hoja, finalmente los valores obtenidos por cada hoja fueron promediados para considerar un único valor como representativo del estado vegetativo de la planta. En la Figura 37 se muestra los valores SPAD promedio obtenidos para cada evaluación a lo largo del ensayo.

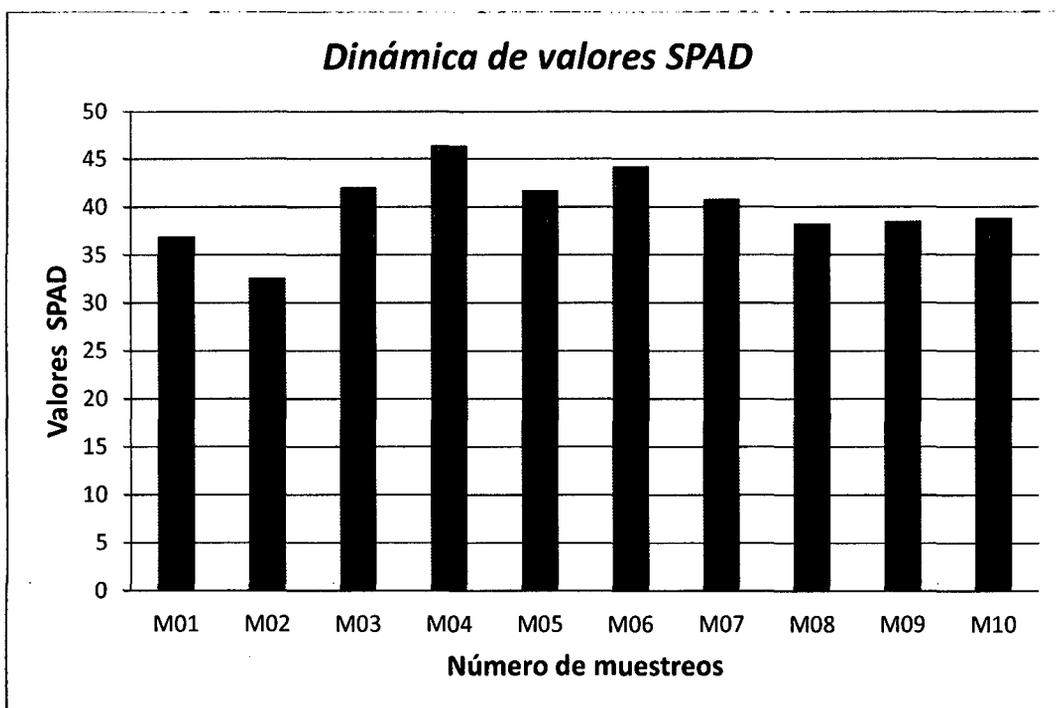


Figura 37. Dinámica de los valores SPAD a lo largo del ensayo.

El índice de vegetación normalizado (NDVI), es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación a partir de sensores remotos que miden la radiación de bandas específicas del espectro electromagnético que la vegetación refleja. Durante el ensayo, el NDVI fue obtenido por intermedio de una cámara agrícola Dycam que presenta un par de arreglos CCD de 496 x 365, con un rango espectral de 0.6-0.75 μm y 0.75-1.25 μm para el sensor rojo e infrarrojo, respectivamente. Las imágenes adquiridas por la cámara Dycam, fueron procesadas por intermedio del software Briv32, el cual nos permite seleccionar las zonas de la imagen que nos interesa y calcular el NDVI para cada pixel de la región seleccionada, brindando el valor promedio de la región seleccionada. La Figura 38 nos muestra la dinámica del NDVI a lo largo del ensayo, donde se puede destacar el hecho que alrededor de los 100 días después de la siembra el NDVI obtiene su máximo valor, fecha que se relaciona con el inicio de la tuberización.

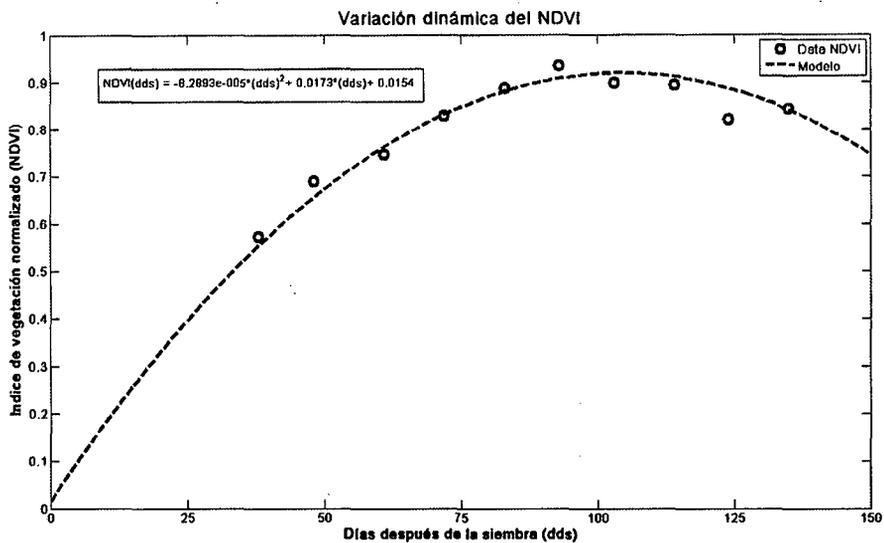


Figura 38. NDVI de plantas de papa de la variedad Cancán a lo largo del ensayo.

El LAI, representa la capacidad de las plantas para cubrir un área de suelo. El LAI es un parámetro fisiológico importante e indispensable en todo modelo de simulación de fotosíntesis. Tradicionalmente se obtiene a partir de muestreos destructivos que calculan el área de las hojas por intermedio de un escáner. La producción de materia seca por unidad de superficie es pequeña durante la fase inicial del crecimiento de la planta, debido al escaso desarrollo del área foliar, pero a medida que se incrementa el área foliar, la productividad también aumenta hasta alcanzar un máximo valor, para luego disminuir debido a la senescencia. La Figura 39 representa la variación del LAI desde el día de la siembra hasta la cosecha y al igual que el NDVI presenta su máximo valor alrededor de los 100 días después de la siembra (DDS). Este hecho y tomando en cuenta la similitud entre sus distribuciones permite considerar la predicción del LAI a partir del NDVI, modelo que se estudió en el capítulo 4.2, y se puede apreciar en la Figura 40 y la ecuación (5 – 1).

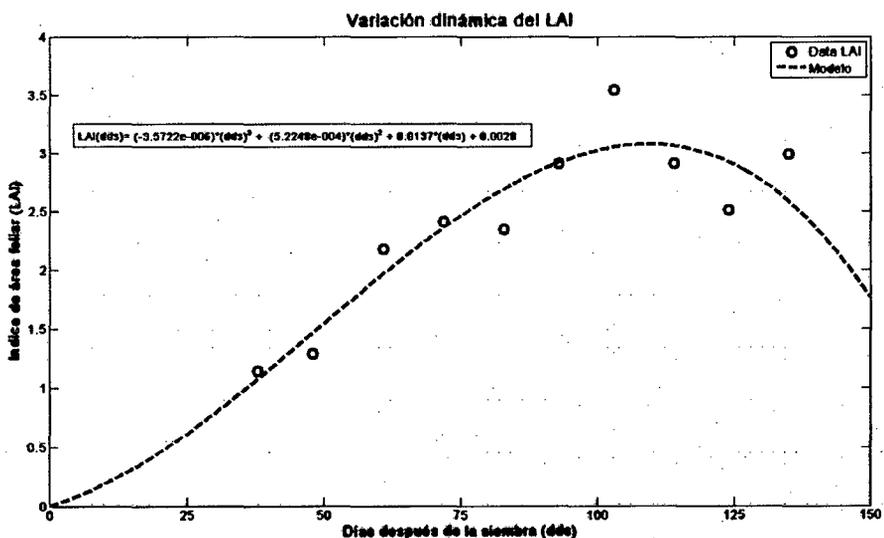


Figura 39. LAI de plantas de papa de la variedad Cancán a lo largo del ensayo.

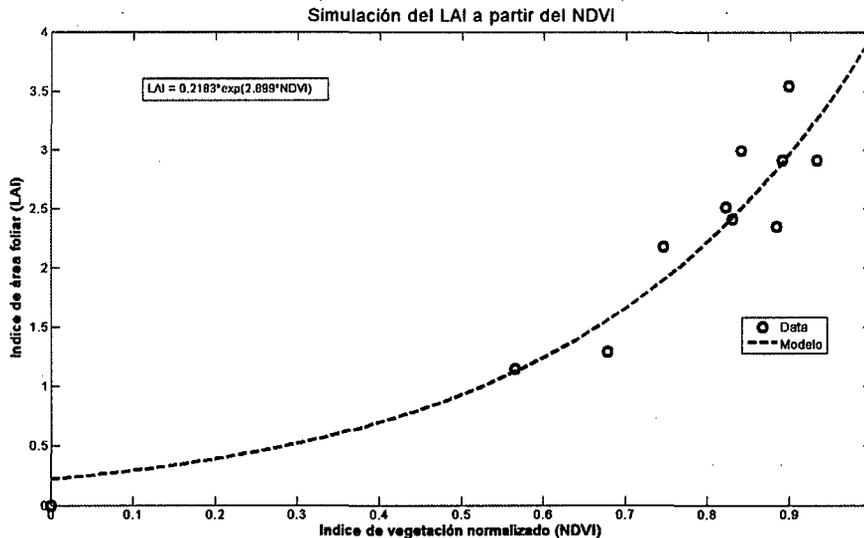


Figura 40. Estimación del LAI a partir de NDVI.

$$LAI = 0.2138 * \exp(2.899 * NDVI) \quad \dots (5 - 1)$$

Además de datos espectrales como el NDVI, valores SPAD o la luz que refleja la vegetación y datos climáticos como la PAR incidente y la temperatura, que se recopilaban con una estación meteorológica Davis instalada al interior del invernadero, el modelo requiere de parámetros fisiológicos que caractericen la variedad y el tipo de planta. Estos parámetros fisiológicos, son obtenidos a partir de equipos especializados como analizadores de CO₂ que miden la capacidad de asimilación y fijación de CO₂ de las plantas y equipos de fluorescencia que miden la eficiencia fotosintética y el rendimiento cuántico de las hojas.

Ya que para este trabajo no se pudo contar con los equipos mencionados líneas arriba, se consideraron valores propuestos por literatura que estudia plantas C3 como la papa, como por ejemplo los trabajos de Jones *et al.*, 1992, pp. 204-205 y Lieth y Reynolds *et al.*, 1987. Se asumió que tanto ξ , parámetro que representa la pendiente inicial de la gráfica (P_{leaf} vs I_{leaf}), y α , eficiencia fotosintética, permanecieron constantes durante todo el periodo vegetativo de la planta, presentando los siguientes valores:

$$\alpha = 1 * 10^{-8} \text{KgCO}_2 (\text{JPAR})^{-1}$$

$$\xi = 0.9$$

El P_{max0} , valor máximo de fotosíntesis saturado por luz en el tope del follaje, puede aclimatarse a diferentes condiciones y asumir un amplio rango de valores (Prioul *et al.*, 1980; Evans y Terashima *et al.*, 1988; Petterson y McDonald *et al.*, 1994; Hikosaka y Terashima *et al.*, 1996; Walcroft *et al.*, 1997). En el modelo, se consideró una dependencia lineal del P_{max0} con el NDVI ya que el NDVI expresa la edad o el estado vegetativo del follaje. Como valor inicial de P_{max0} se asumió el valor propuesto por Jones *et al.*, 1992, tabla 7-3, p. 190.

$$P_{max0} = 1 * 10^{-6} \text{KgCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

5.3. Análisis y resultados

Un ejemplo de la simulación se aprecia en la Figura 41. El P_{max0} es uno de los parámetros más importantes del modelo y ante la ausencia de un analizador de CO_2 , se realizaron múltiples iteraciones para encontrar los valores adecuados de P_{max0} , encontrándose que los valores de P_{max0} corregidos con el NDVI, representaron con mejor eficiencia la materia seca medida. La simulación que se presenta en la Figura 41 consideró un valor de eficiencia fotosintética constante e igual a $1 * 10^{-8} KgCO_2 (JPAR)^{-1}$, según el trabajo de Jones *et al.*, 1992, pp. 204-205 y Lieth y Reynolds *et al.*, 1987, y permitió explicar el 99% de la variancia de los datos medidos. La dinámica del P_{max0} en el tiempo se corrigió utilizando valores de NDVI, debido a que este índice integra la información de la planta y es un indicador de la condición y la cantidad de vegetación del cultivo.

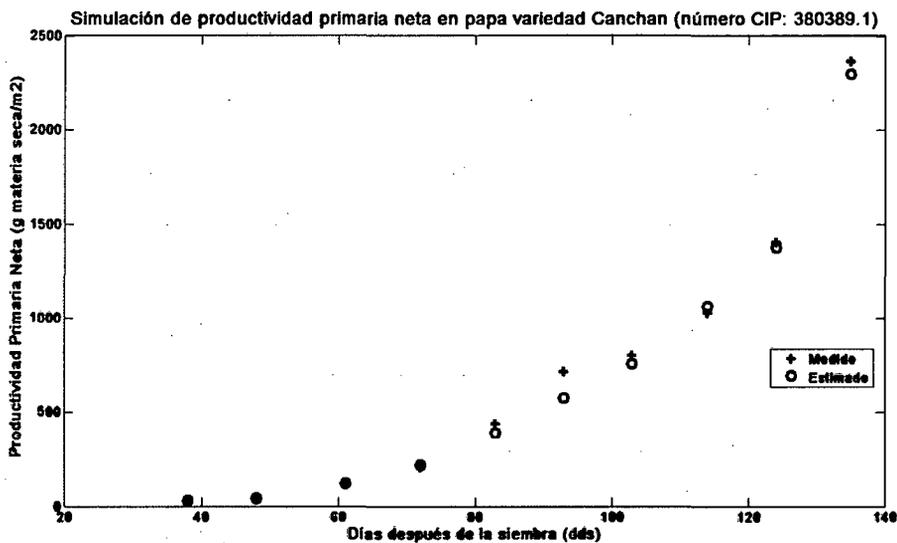


Figura 41. Simulación de biomasa neta (g materia seca/m²) - variedad Canchan.

Si tenemos datos X e Y que se relacionan siguiendo una tendencia lineal y asumimos que se trata de predecir el comportamiento de Y usando X, entonces el modelo de regresión simple es de la forma:

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon$$

Donde:

Y es la llamada variable dependiente o de respuesta,

X es la llamada variable predictora o independiente,

α es el intercepto de la línea con el eje Y,

β es la pendiente de la línea de regresión,

ε es un error aleatorio, el cual se supone que tiene media 0 y variancia constante σ^2 .

Una prueba de hipótesis es un procedimiento basado en la evidencia muestral y en la teoría de la probabilidad para determinar si la hipótesis es un enunciado razonable y no debe rechazarse o si no es razonable y debe ser rechazado.

Se pueden hacer pruebas de hipótesis y considerar:

$$H_0: \beta = 0 \text{ y } H_1: \beta \neq 0$$

De aceptarse la hipótesis H_0 , significaría que la pendiente de la línea de regresión es cero, es decir que la variable predictora no se relaciona linealmente con la variable de respuesta.

Si se rechaza la hipótesis nula, quiere decir que la variable X es importante para predecir el valor de Y usando una regresión lineal. En cambio si se acepta la hipótesis nula se llega a concluir que la variable X no es importante para predecir el comportamiento de Y usando una regresión lineal.

Se utilizó una prueba t-student y se calculó el valor de la probabilidad P-value, sabiendo que un valor del P-value menor a 0.05 rechaza la hipótesis nula. Se obtuvo un valor del estadístico $t = 43.6$ y un $P - \text{value} = 0.000$, lo que rechaza la hipótesis nula, por lo que hay suficiente evidencia estadística para concluir que la biomasa neta (PPN) simulada puede predecir la PPN medida.

Intervalos de confianza para el valor medio de Y e intervalo de predicción:

A nivel poblacional, para cada valor de la variable X existe una población de valores de Y, la cual se asume que se distribuye normalmente con cierta media y varianza constante σ^2 . Lo que se busca es establecer un intervalo de confianza para dicha media asumiendo que la relación entre X e Y es lineal. Dado un valor X_0 de la variable X es natural pensar, que un estimado del valor medio de las Y's es $\hat{Y}_0 = \hat{\alpha} + \hat{\beta}X_0$. Usando las propiedades distribucionales de este estimado se puede establecer que un intervalo de confianza (CI) del 100 $(1 - \alpha)$ % para el valor medio de todos los valores Y dado que $X = X_0$ es como sigue:

$$\hat{Y}_0 \pm t_{(1-\alpha/2, n-2)} S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}}$$

Por otro lado muchas veces estamos interesados en estimar solamente un valor de Y correspondiente a un valor dado X_0 . El estimado puntual será el mismo \hat{Y}_0 , y usando propiedades distribucionales de $\hat{Y}_0 - Y_0$ se obtiene que un intervalo de confianza del 100 $(1 - \alpha)$ % para el valor predicho de Y dado que $X = X_0$ es de la forma:

$$\hat{Y}_0 \pm t_{(1-\alpha/2, n-2)} S \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{S_{xx}}}$$

Este intervalo de confianza es llamado intervalo de predicción (PI). Es más riesgoso hacer predicciones para un solo valor que para un valor medio, por esta razón el intervalo de predicción de Y es más ancho que el intervalo de confianza que para el valor medio.

Así por ejemplo, hay un 95% de confianza que el valor medio de todos los valores de biomasa neta o PPN medidos en campo con un valor de 1500 gramos de materia seca por metro cuadrado (g MS/m^2), se encuentren entre 1486.5 y 1601.4 g MS/m^2 de PPN obtenidos a través de la simulación y hay un 95% de confianza que un valor de PPN

medido de 1500 g MS/m² se encuentre entre 1413.5 y 1674.4 g MS/m² de PPN obtenidos a partir de la simulación.

En la Figura 42 se muestran las bandas de confianza para el valor medio y para el valor predicho (PI) del ajuste de regresión lineal entre los valores simulados y medidos de biomasa neta o PPN.

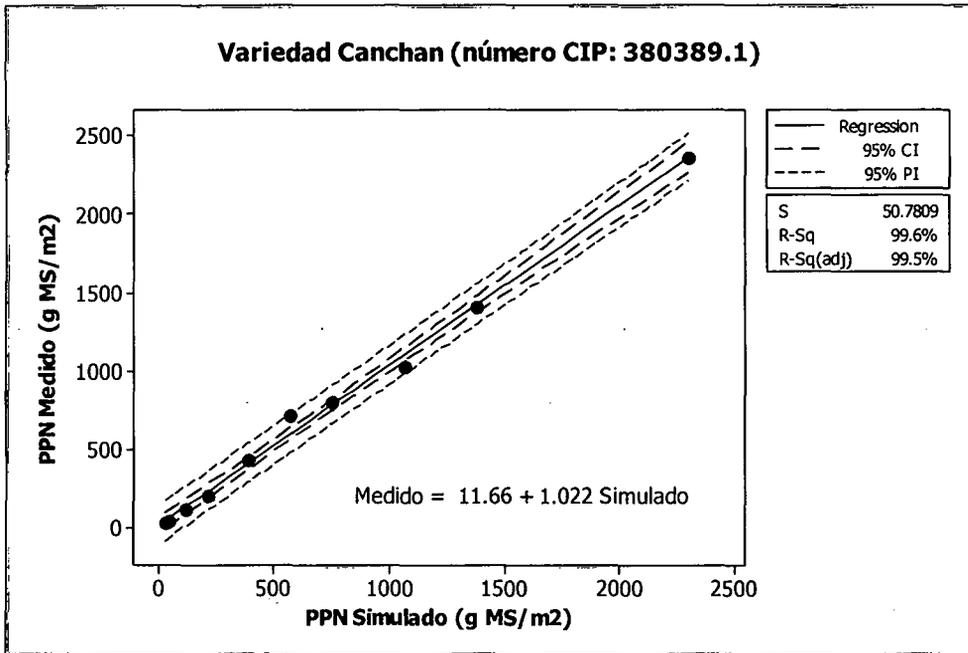


Figura 42. Ajuste lineal e intervalos de confianza de PPN medida y simulada.

Análisis de residuales:

Un residual es la diferencia entre el valor observado o medido (y_i) y el valor estimado por la regresión (\hat{y}_i), es decir $r = y_i - \hat{y}_i$. El residual puede ser considerado como el error aleatorio (e_i) observado. Un análisis de residuales nos brinda información sobre las razones del porqué el modelo no se ajusta a los datos. Por esta razón es necesario realizar un análisis de residuales y obtener cualquier peculiaridad que el ajuste de regresión puede tener.

Cuando se propone un modelo para el ajuste de datos se establecen algunos supuestos de la variable error. Un análisis de residuales permite cotejar si las suposiciones del modelo de regresión se cumplen y se puede detectar:

- Si hay normalidad de los errores.
- Si hay varianza constante y si hay independencia de los errores.
- Si hay valores anormales en la distribución de errores.

El histograma de los residuales, permite cotejar la normalidad de los errores. Cuando el histograma es simétrico, con un pico en el centro se concluye que hay normalidad, como se puede apreciar en la Figura 43.

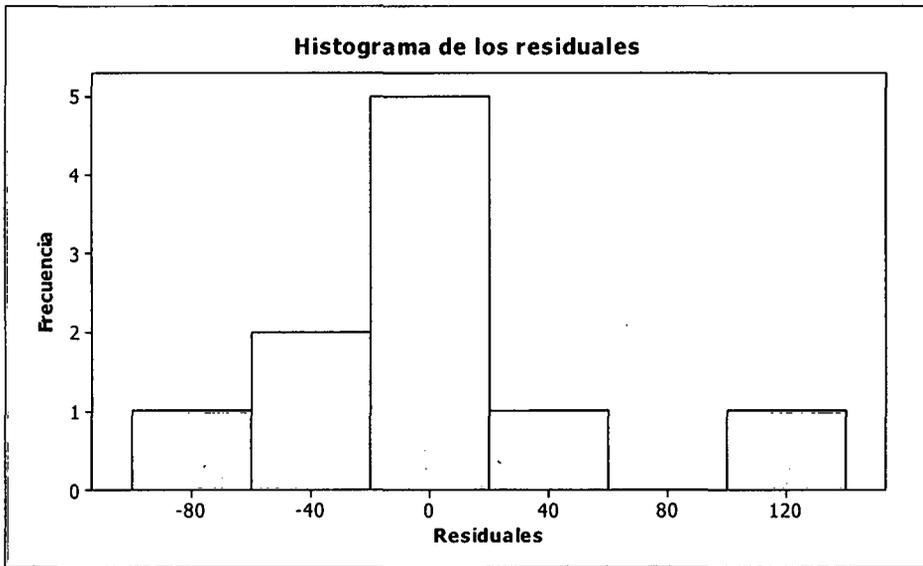


Figura 43. Histograma de residuales - Frecuencia vs residuales.

La gráfica de los residuales versus los valores predichos que se aprecia en la Figura 44 permite observar que la varianza de los errores no es constante con respecto a la variable de respuesta, pues tiende a aumentar cuando el valor de la variable respuesta aumenta.

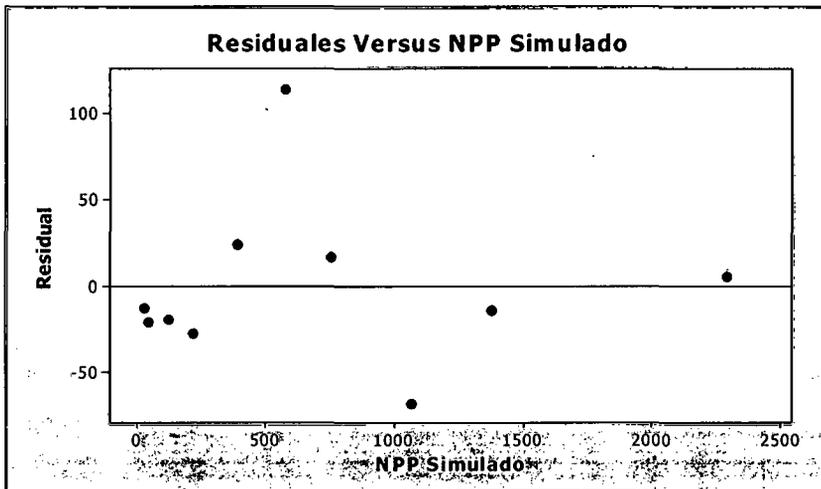


Figura 44. Residuales versus el valor de PPN simulado.

Una gráfica de los residuales versus el índice de observación permite detectar si hay datos anormales o datos que están bastante alejados. Si se usan residuales estandarizados, entonces un dato con residual más allá de 2 o -2 es considerado un outlier en el sentido vertical. Así, la gráfica de residuales estandarizados versus el índice de la observación que se observa en la Figura 45, muestra que la observación 6 es un outlier, ya que el residual estandarizado se encuentra por encima de 2.

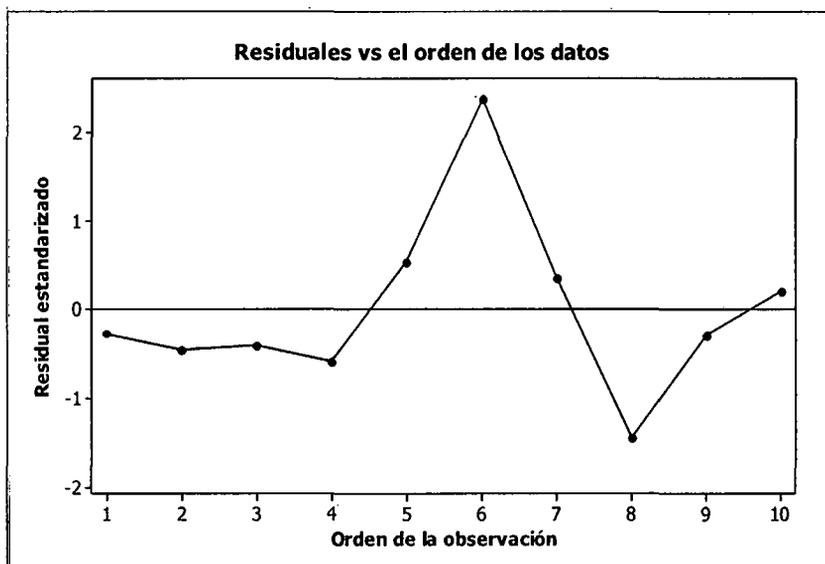


Figura 45. Residuales estandarizados versus el orden de la observación.

Finalmente, la prueba de hipótesis de rechazo de $H_0: \beta = 0$ demuestra estadísticamente que existe una dependencia lineal entre los datos simulados de PPN y los medidos en campo, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 = 99\%$ lo que demuestra la bondad del ajuste lineal entre los datos medidos y los simulados.

5.4. Uso eficiente de la luz (LUE)

El uso eficiente de luz (LUE, $g C MJ^{-1}$) se refiere a la habilidad que tienen las plantas de usar la luz para realizar fotosíntesis y se define como la razón entre la biomasa acumulada ($g C m^{-2} dia^{-1}$) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR, $MJ m^{-2} dia^{-1}$). En modelos de crecimiento de cultivo, debido básicamente a su simplicidad y a la evidencia experimental disponible, el LUE es una aproximación que se utiliza para calcular la conversión de Mega Joules de luz a gramos de masa seca total.

Numerosos investigadores, como es el caso de Monteith *et al.*, 1977, Gallagher y Biscoe *et al.*, 1978 y García *et al.*, 1988 aseguran que la relación entre el tiempo integral de interceptación de la radiación y la producción de masa seca es constante. Por otro lado, los análisis teóricos realizados por Hammer y Wright *et al.*, 1994, Dewar *et al.*, 1996, Haxeltine y Prentice *et al.*, 1996, Dewar *et al.*, 1998, Medlyn *et al.*, 1998 y Kage *et al.*, 2001a presentan al LUE, en un amplio rango de días, como equivalente a la suma de la radiación fotosintéticamente activa en un efecto combinado de la adaptación del aparato fotosintético a la radiación ambiental dentro del dosel y en el tiempo (Kage *et al.*, 2001b).

A través de modelos empíricos es posible estimar la producción de materia seca como resultado de la radiación interceptada y empíricamente se derivan valores de LUE (Monteith *et al.*, 1977; Gallagher y Biscoe *et al.*, 1978; Jones y Kiniry *et al.*, 1986; Williams *et al.*, 1989).

La estimación de LUE, es una de las aplicaciones prácticas de este trabajo. En modelos de crecimiento potencial de cultivo como el LINTUL (Light Interception and

Utilization) descrito por Spitters *et al.*, 1987 el LUE representa el corazón del modelo y para obtenerlo se requiere muestreos destructivos periódicos que permitan medir este parámetro. El LINTUL es un modelo relativamente simple que calcula el crecimiento de cultivos sobre una base diaria y requiere de parámetros iniciales básicos, lo que lo convierte en un modelo disponible para una escala global y solo limitado por la información de parámetros iniciales disponible. Modelos de predicción de biomasa, como el que se presenta en este trabajo, pueden servir de herramientas para formar parte de modelos a escala global como el LINTUL y prescindir de ensayos destructivos de calibración.

La biomasa simulada a partir del modelo descrito en el capítulo 3, cuyos resultados se aprecian en la Figura 41, junto con los datos de energía PAR interceptada y la biomasa medida de cada uno de los muestreos destructivos realizados durante el experimento de papa de la variedad Canchan (2006) nos permitieron calcular el LUE experimental y el LUE simulado, hecho que podemos apreciar en la Figura 46 y en la Figura 47 respectivamente. De las figuras podemos rescatar que el LUE simulado represento el 96.23% del LUE teórico medido durante el ensayo.

Se debe tomar en consideración que para realizar un correcto cálculo del LUE las ecuaciones de regresión generadas entre la energía interceptada versus la materia seca formada deben necesariamente pasar por el valor inicial 0,0 es decir para un valor de energía PAR acumulada de cero corresponde cero gramos de materia seca producida.

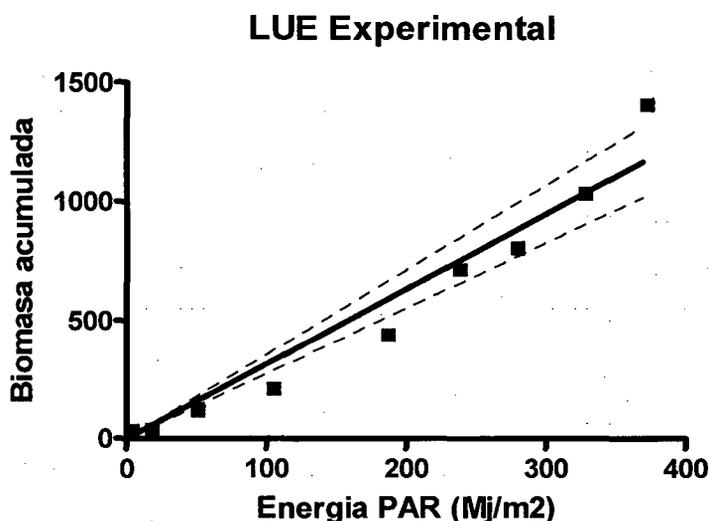


Figura 46. Corresponde al LUE obtenido a partir de los datos de campo.

$$\text{Biomasa} = 3.16 * \text{Energía}$$

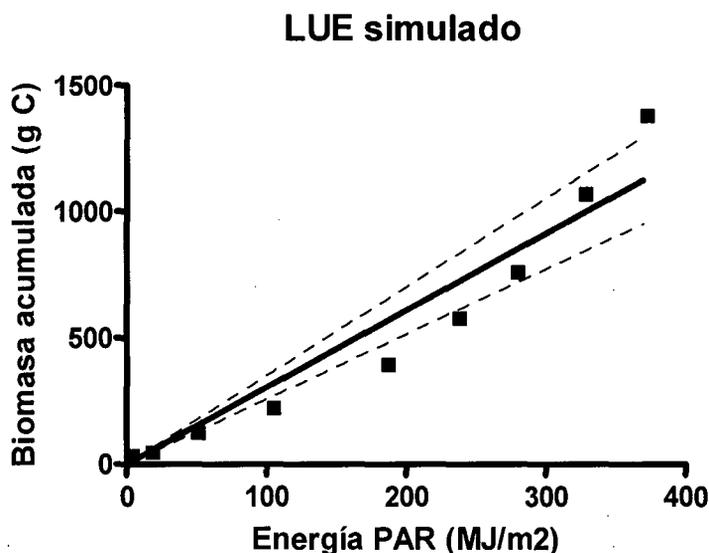


Figura 47. Predicción del LUE a partir de los resultados del modelo.

$$\text{Biomasa} = 3.041 * \text{Energía}$$

5.5. Generación de escenarios

Un modelo es una representación matemática de un sistema y la modelación es el proceso para desarrollar dicha representación. Para que un modelo opere y produzca una imitación del mundo real es necesario que se dé el proceso de simulación (Goudriaan y Van Laar *et al.*, 1994).

Los modelos matemáticos son herramientas útiles para probar hipótesis, sintetizar el conocimiento, describir, entender sistemas complejos y comparar diferentes escenarios. Se usan como soporte para la toma de decisiones en sistemas, control climático de invernaderos, predicción y planeación de la producción (Lentz *et al.*, 1998; Marcelis *et al.*, 1998).

Uno de los objetivos de este trabajo fue analizar y evaluar diferentes escenarios prospectivos resultantes de la variación de diferentes parámetros de entrada como por ejemplo el tiempo o dicho de otra manera los días después de la siembra (dds), la fotosíntesis máxima saturada por luz en el tope del follaje ($P_{\text{max}0}$), el coeficiente de transmitancia de hoja (m), la PAR acumulada, el índice de área foliar (LAI), etc., y su implicancia en la biomasa o materia seca generada.

Considerando los datos climáticos de radiación y temperatura correspondientes al experimento de papa de la variedad Canchan que inició el 23 de Junio del 2006 y culminó el 20 de Noviembre del mismo año, junto con los datos fisiológicos de dicho experimento, podemos simular la producción de materia seca versus parámetros como el tiempo y el incremento lineal del $P_{\text{max}0}$ que abarcan de 7 hasta 16 $\text{KgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

La simulación resultante mostro que un incremento del $P_{\text{max}0}$, que puede ser efecto del estado fenológico del cultivo, los nutrientes en el suelo, la variedad de papa o la

influencia de factores abióticos como la temperatura, luz o CO_2 ambiental, resultan en un incremento de la biomasa acumulada, como se puede apreciar en la Figura 48 y su vista frontal en la Figura 49. Un incremento del $P_{\text{max}0}$ involucraría una mayor acumulación de fotosintatos en la curva fotosíntesis de hoja vs luz, como se puede apreciar en la Figura 12, y sus efectos se reflejarían con una mayor formación de biomasa en la planta, pero debido al comportamiento sigmoideal entre la luz y la fotosíntesis, se obtendrá que a valores altos de $P_{\text{max}0}$, la fotosíntesis se satura, resultando en una reducción de la velocidad de formación de fotosintatos, hasta hacerse constante, hecho que se puede apreciar con mayor claridad en la Figura 49.

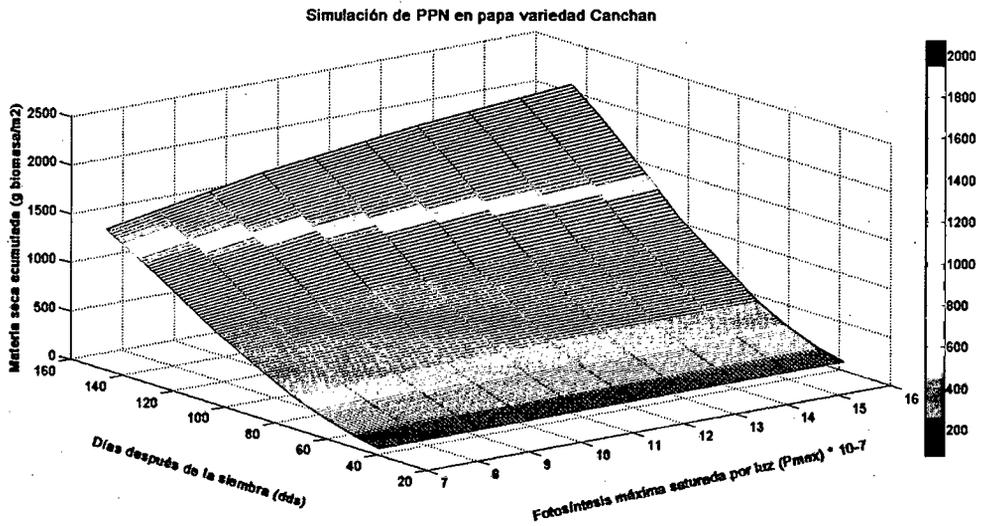


Figura 48. Simulación de biomasa para valores de $P_{\text{max}0}$ entre 7 y 16 $\text{KgCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

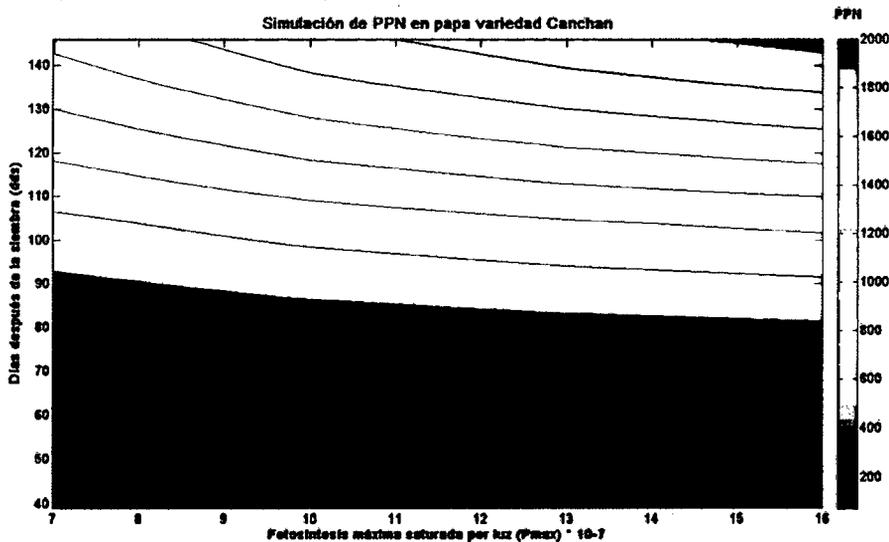


Figura 49. Proyección de la biomasa con respecto a dds y $P_{\text{max}0}$.

Ahora, para un periodo vegetativo determinado (dds) y considerando los datos fisiológicos del experimento de papa Canchan del 2006, simulamos la respuesta del cultivo sometido a una incremento del PAR acumulado (MJ m^{-2}) y al coeficiente de

transmitancia de hoja, como podemos observar en la Figura 50 y su vista frontal en la Figura 51. La fotosíntesis se ve favorecida con la luz, ya que los pigmentos permitirían recoger mayor cantidad de electrones para los fotosistemas I y II, por lo que a mayor PAR acumulada (MJ m^{-2}) tendremos una mayor producción de materia seca (g MS m^{-2}). Pero para el caso del coeficiente de transmitancia de luz (m) un incremento de este parámetro involucraría una disminución de la capacidad de la hoja para coleccionar luz, debido quizás a una reducción de la concentración de pigmentos en la hoja, lo que finalmente conllevaría a una reducción de la capacidad de acumular carbohidratos de la planta.

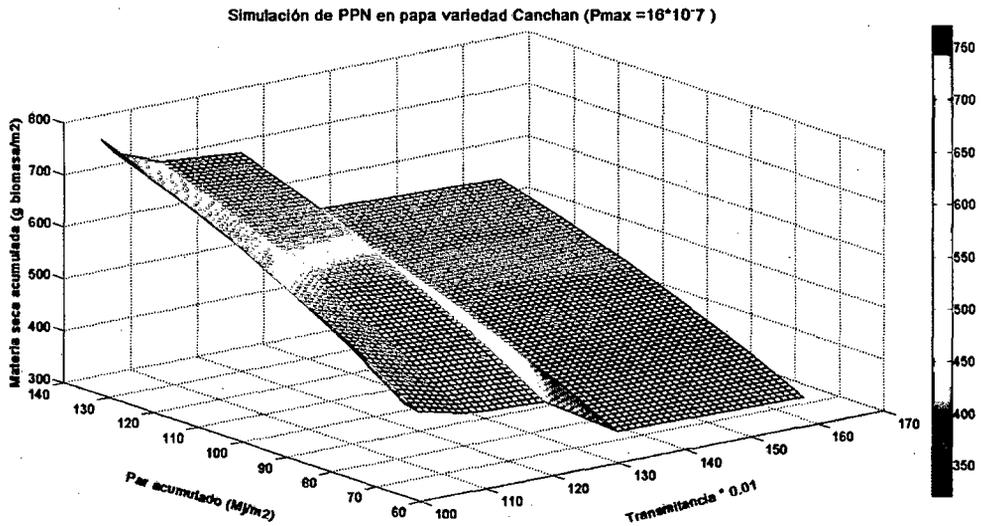


Figura 50. Simulación de PPN vs la PAR acumulada y la transmitancia de hoja (m).

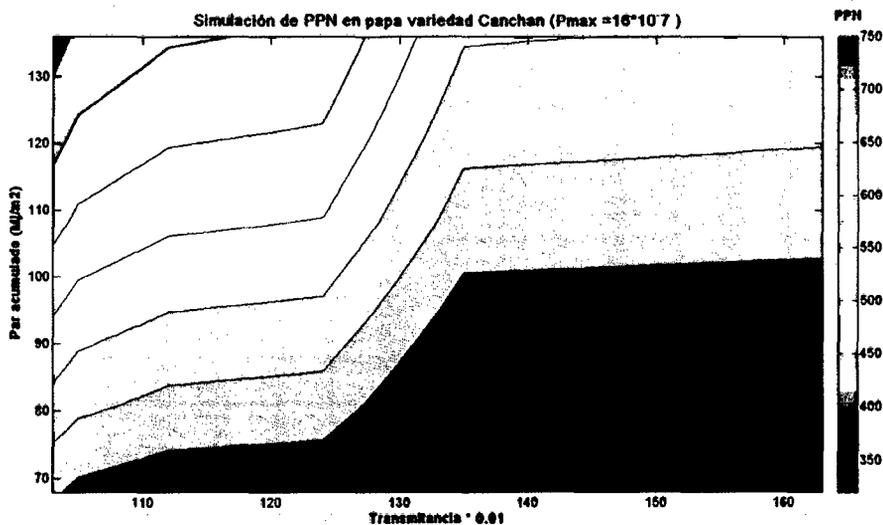


Figura 51. Proyección de la PPN sobre el plano de transmitancia y PAR acumulada.

La respuesta del modelo a variaciones del LAI y la energía PAR acumulada por unidad de área se aprecian en la Figura 52 y su respectiva proyección en la Figura 53. La mayor incidencia de luz favorece la formación de biomasa y de igual manera el incremento del LAI involucra una mayor cantidad de hojas receptoras de luz que favorecen la

fotosíntesis, por lo que resulta también en beneficio del rendimiento, pero similarmente al caso de la relación entre la luz y la fotosíntesis en hojas, la relación entre la biomasa final y el LAI presentan un comportamiento similar (Figura 53). La biomasa acumulada se satura para valores elevados de LAI, debido principalmente a que los estratos inferiores de la planta no contribuyen a la formación de materia seca ya que el porcentaje de luz difusa que penetra al interior del follaje disminuye al incrementarse el valor del LAI.

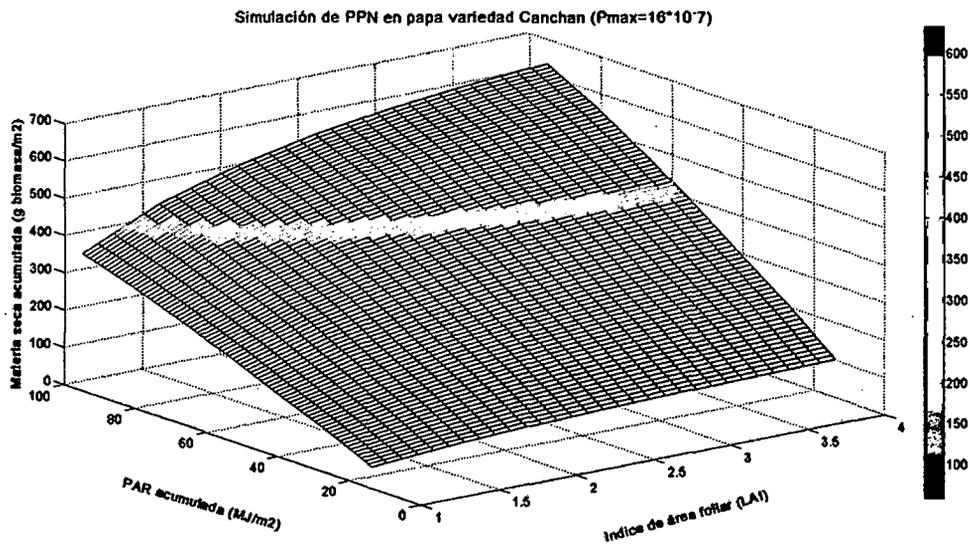


Figura 52. Simulación de PPN vs. PAR acumulada y LAI.

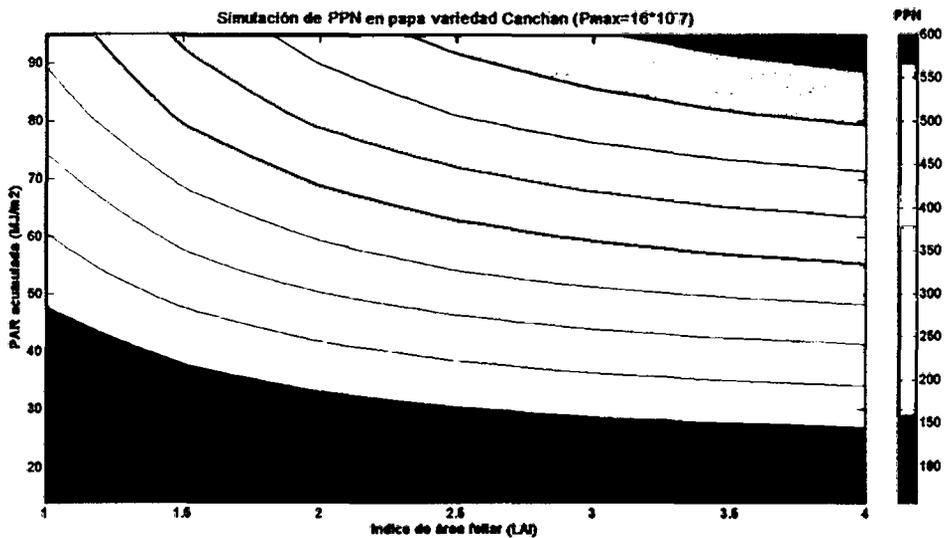


Figura 53. Proyección de PPN sobre el plano de LAI y PAR acumulada.

5.6. Discusiones y conclusiones

El modelo estudiado en este trabajo presentó un coeficiente de determinación del 99% con respecto a los datos medidos, aunque cabe recordar que para alcanzar este resultado se calibraron algunos de sus parámetros fisiológicos utilizando múltiples iteraciones hasta converger en los valores adecuados para este ensayo.

Modelos del tipo Farquhar representan el proceso de fotosíntesis de forma más precisa y real ya que consideran el intercambio de gases como el CO_2 y O_2 a nivel de hoja. Un modelo bioquímico como el de Farquhar et al., 1980, está basado en las propiedades cinéticas de la enzima rubisco. La importancia de la rubisco en la determinación de la tasa de fotosíntesis ha sido inferida inicialmente desde la correlación entre la tasa fotosintética y la cantidad de la proteína rubisco en la hoja. La descripción de un modelo como el de Farquhar considera la tasa fotosintética gruesa de hojas limitadas por la rubisco y limitadas por la luz, requiriendo parámetros fisiológicos como las concentraciones de CO_2 intercelular, el punto de compensación de CO_2 con la respiración en la oscuridad, las presiones parciales de CO_2 y O_2 , etc., que requieren de análisis de laboratorio y equipo especializado que dificultan la validación de este tipo de modelos. Como alternativa se presentan los modelos mecanísticos basados en la interacción de la luz con el follaje, simplificando el proceso de fotosíntesis y sus fases luminosa y oscura.

Por lo general los modelos de predicción de biomasa, como por ejemplo LINTUL, utilizan datos promedios diarios lo que simplifica el cálculo y reduce la cantidad de datos que requiere el modelo. Considerar un periodo horario de simulación quizás puede implicar una mayor demanda de datos y esfuerzo computacional pero permite una simulación más realística del proceso de fotosíntesis, ya que toma en cuenta la variación no lineal de la radiación solar a lo largo del día, permitiendo considerar el cierre de estomas que ocurre cuando la radiación alcanza valores por encima de los umbrales de saturación que soportan las plantas, y en consecuencia el modelo deja de acumular fotosintatos, mejorando las estimaciones de materia seca acumulada. Por el contrario, el común de los modelos de predicción de materia seca considera promedios diarios de radiación o energía acumulada lo que tiende a sobrestimar los valores de PPN simulada.

Las simplificaciones que se consideran para obtener una solución analítica del proceso de fotosíntesis aunque útiles, pueden resultar en algunos casos una sobrestimación de la realidad. Como por ejemplo, considerar un decaimiento exponencial de la luz en función del LAI, quizás puede resultar en una subestimación de la cantidad de luz que alcanza el interior del follaje, aunque según Monsi y Saeki (1953) y trabajos similares como los que he realizado, la simplificación ha brindado resultados aceptables. De la misma manera, considerar un follaje uniformemente horizontal puede sobrestimar la capacidad de interceptar luz del follaje, puesto que hojas localizadas en diferentes niveles al interior del volumen de la planta pueden tener diferentes orientaciones con respecto a la luz incidente, por lo que considerar un follaje con hojas orientadas y distribuidas al azar atenúan esta simplificación.

La disminución exponencial del $P_{\text{max}0}$ en función del LAI al interior del follaje, puede subestimar la capacidad máxima de acumulación de fotosintatos para hojas sombreadas en los estratos más bajos de la planta. Aunque esta subestimación puede resultar relativamente importante ya que cuando la planta alcanza valores altos de LAI, gran

parte de la fotosíntesis de la planta proviene del tercio superior del follaje, como lo afirma Acock *et al.*, 1978.

Uno de los temas a mejorar y tomar en cuenta en este trabajo es el modelo de simulación de respiración autotrófica. Este proceso resta parte de la energía acumulada por el proceso de fotosíntesis y requiere de una mayor atención debido a que considera parámetros fisiológicos del cultivo que necesitan de muestreos destructivos y análisis de laboratorio que no pueden ser calculados a partir de percepción remota.

Como hecho importante puedo mencionar que el inicio de la etapa de tuberización, que ocurrió aproximadamente a los cien días después de la siembra, coincidió con la etapa en la que tanto el LAI como el NDVI alcanzaron su máximo valor lo que podría implicar que existe una relación entre el crecimiento del follaje y las etapas fenológicas del tubérculo. Es decir el momento que la planta alcanza su máxima cobertura foliar puede significar el inicio de llenado del tubérculo.

Luego que la planta alcanzó la máxima cobertura foliar, tiene lugar un proceso de reducción del LAI, que culmina con la senescencia de la planta, y que debería implicar una disminución en la fijación de CO_2 ya que la cantidad de hojas colectoras de luz disminuyen. Pero contrario a lo que debería pasar, la materia seca total del cultivo en lugar de disminuir se incrementa con mayor velocidad, hecho que se atribuye a un mecanismo de supervivencia de la planta para llenar y formar tubérculos y que se refleja con un incremento de la eficiencia de la planta para realizar fotosíntesis y acumular carbohidratos o fotosintatos.

Los resultados obtenidos y que se aprecian en la sección 5.3 muestran que el modelo toma en cuenta los procesos más importantes involucrados en el proceso de crecimiento y desarrollo de un cultivo C3 como la papa ya que las predicciones del modelo se aproximan, después de un proceso de calibración, en forma aceptable a las mediciones de biomasa del cultivo, además de resultar una herramienta práctica y eficiente ya que no involucra una gran cantidad de variables y un excesivo gasto computacional aunque es importante señalar que el resultado de la simulación depende en gran medida del valor de fotosíntesis máxima saturada por luz (P_{max}) por lo que resulta importante medir este parámetro durante el ensayo o caso contrario contar con una base de datos, en diferentes etapas del crecimiento del cultivo de la papa.

Bibliografia

Acock B. 1991. Modeling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature and leaf traits. In: Boote KJ, Loomis RS, eds. Modelling photosynthesis - from biochemistry to canopy. CSSA Special Publication number 19. Madison, Wisconsin: Crop Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc., 41-55.

Acock B, Charles-Edwards DA, Fitter DJ, Hand DW, Ludwig J, Warren Wilson J, Whithers AC. 1978. The contribution of leaf from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: an experimental examination of two canopy models. *Journal of Experimental Botany* 29: 815-827.

Amthor JS, Loomis RS. 1996. Integrating knowledge of crop responses to elevated CO₂ and temperature with mechanistic simulation models: model components and research needs. In: GW Koch, HA Mooney (eds) Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems. Academic Press, San Diego, 317-345.

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., Huete, A. R. 1995. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, pp. 95-120.

Bruinsma, J. 1963. The quantitative analysis of chlorophyll a and b in plant extracts. *Protochem and Photobiol* 2: 241-249.

Campbell, G.S., and J.M. Norman. 1998. An introduction to environmental biophysics. 2nd ed. Springer-Verlag, New York.

Carlson, T.N. and D. A. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62:241-252.

Carter, G. A. 1993. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany* 80: 239-243.

Carter, G. A. 1994. Ratios of leaf reflectance in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15: 697-703.

Carter, G. A., J. Rebeck, and K. E. Percy. 1995. Leaf optical properties in *Liriodendron tulipifera* and *Pinus strobus* as influenced by increased atmospheric ozone and carbon dioxide. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 407-412.

Carter, G. A., W. G. Cibula, and R. L. Miller. 1996. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress. *Journal of Plant Physiology* 148: 516-523.

Chappelle, E. W., M. S. Kim, and J. E. McMurtrey III. 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing of Environment* 39: 239-247.

Charles-Edward DA. 1981. The mathematics of photosynthesis and productivity. London Academic Press.

Chason, J. W., Baldocchi, D. D. and Huston, M. A. 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* 57, 107-128.

Clevers, J.G.P.W. 1989. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Remote Sensing of Environment* 29:25-37.

Curran, P.J., J.L. Dungan, and H.L. Gholz. 1990. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiol.* 7:33-48.

Curran, P.J., J.L. Dungan, and H.L. Gholz. 1992. Seasonal LA1 in slash pine estimated with Landsat TM, *Remote Sensing of Environment* 39:3-13.

Datt, B. 1998. Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment* 66: 111-121.

Datt, B. 1999. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using Eucalyptus leaves. *Journal of Plant Physiology* 154: 30-36.

De Jong, J. B. R. M. 1980. Een karakterisering van de zonnestraling in Nederland. p. 96-97. Doctor-aalverslag Vakgroep Fysische Aspecten van de Gebouwde Omgevingafd. Bouwkunde en Vakgroep Warmte - en Stroomingstechniekenafd. Werktuigbouwkunde, Technische Hogeschool (Techn. Univ.) Eindhoven, Netherlands.

Decoteau, D.R. 1997. The perception of light and color by plants: Implications in agri-plastics. IV Congreso Internacional de Nuevas Tecnologías Agrícolas, Puerto Vallarta, Mexico Memories.

Dewar, R.C., B.E. Medlyn y R.E. Mc Murtrie. 1998. A mechanistic analysis of light and carbon use efficiencies. *Plant Cell Environ.* 21, 573-588.

Dewar, R.C., 1996. The correlation between plant growth and intercepted radiation: an interpretation in terms of optimal nitrogen content. *Ann. Bot.* 78, 125-136.

Eisberg R., Resnick R. 1978. Física Cuántica. Átomos, moléculas, sólidos, núcleos y partículas. Ed. Limusa. 833 pp.

Evans JR, Terashima I. 1988. Photosynthetic characteristics of spinach leaves grown with different nitrogen treatments. *Plant and Cell Physiology* 29: 157-165.

Farquhar, G. D., Von Caemmerer, S., Berry, J.A., 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 149, 78-90.

Fassnacht KS, Gower ST, Norman JM, McMurtrie RE. 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 71, 183-207.

Fassnacht, K., Gower, S., MacKenzie, M., Nordheim, E., and Lillesand, T. 1997. Estimating the leaf area index of north central Wisconsin for ests using the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment* 61: 229–245.

Filella, I., I. Serrano, J. Serra, and J. Penuelas. 1995. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis. *Crop Sci.* 35:1400–1405.

Follet, R.H., R.F. Follet and A.D. Halverson. 1992. Use a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 23: 687-697.

Gallagher, J.N. and P.V. Biscoe. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci.* 91: 47-60.

Garcia, R., E.T. Kanemasu, B.L. Blad, A. Bauer, J.L. Hatfield, D.J. Major, R.J. Reginato and K.G. Hubbard. 1988. Interception and use efficiency of light in winter wheat under different nitrogen regimes. *Agric. For. Meteorol.* 44: 175-186.

Gitelson, A. A., and M. N. Merzlyak. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *A. esculus hippocastanum* L. and *Acer Platanoides* L. leaves: spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology* 143: 286–292.

Goudriaan, J. 1977. *Crop micrometeorology: a simulation study.* Simulation Monograph, Pudoc, Wageningen, 299 pp.

Goudriaan, J. 1982. Potential production processes. p. 98–113. In F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (ed.). *Simulation of plant growth and crop production.* Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

Goudrian, J. and van Laar, H.H. 1994. *Current sigues in production ecology. Modelling potential growth processes.* Text book with exercises. Kluwer Academic Publishers, Londres.

Gower, S.T., Vogel, J.G. Norman, J.M., Kucharik, C.J., Steele, S.J. and Stow, T.K., 1997. Carbon distribution and above ground net primary productivity in aspen, jack pine, and black spruce stands in Sakatchewan and Manitoba, Canada. *J. Geophys. Res.* 102, 29029-29041.

Grossi Gallegos, H. 2003 Estimación de la distribución espacial en Argentina de la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR). En *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, vol.1, pp. 543-544, Santa María, RS, Brasil.

Hammer, G.L. y G.C. Wright. 1994. A theoretical analysis of nitrogen and radiation effects on radiation use efficiency in peanut. *Aust. J. Agric. Sci.* 45: 575-589.

- Hikosaka, K. and Terashima, I. 1996 Nitrogen partitioning among photosynthetic components and its consequences in sun and shade plants. *Functional Ecology* 10: 334-353.
- Haxeltine, A. e I.C. Prentice. 1996. A general model for the light-use efficiency of primary production. *Funct. Ecol.* 10: 551-561.
- Jones, C.A. and J.R. Kiniry. 1986. CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development. A&M University Press, Texas.
- Jones HG. 1992. Plants and microclimate. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Justice, C.O., 1986. Monitoring East African Vegetation Using AVHRR Data, *International Journal of Remote Sensing*, 7(11):1453-1474.
- Kage, H., C. Alt and H. Stützel. 2001a. Predicting dry matter production of cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis) under unstressed conditions. Part I. Photosynthetic parameters of cauliflower leaves and their implications for calculations of dry matter production. *Scientia Hort.* 87: 155-170.
- Kage, H., H. Stützel y C. Alt. 2001b. Predicting dry matter production of cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis) under unstressed conditions Part II. Comparison of light use efficiency and photosynthesis-respiration based modules. *Scientia Hort.* 87, 171-190.
- Kantety, R.V., E. van Santen, F. M. Woods and C.W. Wood. 1996. Chlorophyll meter predicts nitrogen status of tall fescue. *Plant Nutr.* 19: 881-889.
- Keulen, H. Van.; Penning de V., F.W.T. Drees, E.M. 1982. A summary model for crop growth. in: Pennind de V., F.W.T. Laar, H.V. Eds. *Simulation of plant growth and crop production*. Wageningen, Netherland. Centre for agriculture Publishing and documentation, p 87.
- Kimball, J.S. Thornton, P.E., White, M.A, Running and S.W. 1997. Simulating forest productivity and surface-atmosphere carbon exchange in the BOREAS study region. *Tree Physiol.* 17: 589-599.
- Kirk, J T O, and Tilney-Bassett, R A E. 1978. *The Plastids: Their Chemistry, Structure, Growth and Inheritance*, 2nd edn, Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam.
- Knipling, E. B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment* 1: 155-159.
- Krugh, B., L. Bichham and D. Miles. 1994. The solid-state chlorophyll meter, a novel instrument for rapidly and accurately determining the chlorophyll concentrations in seedling leaves. *Maize genetics cooperation. New Letter* 68: 25-27.
- Lentz, W. 1998. Model applications in horticulture: a review. *Scientia Hort.* 74: 151-174.

Lichtenthaler, H. K., A. Gitelson, and M. Lang. 1996. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. *Journal of Plant Physiology* 148:483–493.

LI-COR. 2001. Win1800 Instruction Manual. Terminal Emulator and Graphics Software for the LI-1800 Portable Spectroradiometer. 47 p.

Lieth JH, Reynolds JF. 1987. The nonrectangular hyperbola as a photosynthetic light response model: geometrical interpretation and estimation of the parameter H. *Photosynthetica* 21: 363 - 366.

Maas, S. J. (1998a). Estimating cotton canopy ground cover from remotely sensed scene reflectance. *Agron. J.* 90:384–388.

Maas, S. J. (1998b), Estimating cotton canopy ground cover using multispectral remote sensing imagery. In *Agronomy Abstracts 1998*, Am. Soc. Agronomy, Madison, WI, pp. 16–17.

Mccree, K.J. 1981. Photosynthetically active radiation. Pages 41-55. In: Lange, O.l., P.s. Nobel, C.B. Osmund, and H. Ziegler (eds.), *Encyclopedia of Plant Physiology*, New Series, Vol. 12a, *Physiological Plant Ecology I*. Springer Verlag, Berlin.

Medlyn, B.E. 1998. Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiol.* 18: 167 - 176.

MINAG. 2012. Series históricas de producción agrícola- Compendio estadístico. Ministerio de agricultura. http://frenteweb.minag.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult (Consultado en: 6 de febrero 2012)

Monsi, M. Saeki T. 1953. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany* 14: 22–52.

Moran, R. 1982. Formulate for determination of chlorophyll pigments extracted with N,N-dimethylformamide. *Plant Physiol.* 69: 1367-1381.

Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B* 281: 277-294.

Moran, J.A., A.K. Mitchell, G. Goodmanson, and K.A. Stockburger. 2000. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: A comparison of methods. *Tree Physiol.* 20:1113–1120.

Oreskes, N., K. Shrader-Frechette, and K. Belitz. 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263: 641–646.

Petterson R, McDonald JS. 1994. Effects of nitrogen supply on the acclimation of photosynthesis to elevated CO₂. *Photosynthesis Research* 39: 389-400.

Possingham, J. V. (1980). Plastid replication and development in the life cycle of higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 31, 113-129.

Prioul J-L, Brangeon J, Reyes A. 1980. Interaction between external and internal conditions in the development of photosynthetic features in a grass leaf. I. Regional responses along a leaf during and after low-light or high-light acclimation. *Plant Physiology* 86: 762-769.

Reeves, W.D., P.L. Mask, C. W. Wood y D.P. Delay. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. Influence of management practices. *J. Plant Nutri.* 16: 7781-7796.

Ritchie, J.T. 1995. Agricultural systems applications through an international consortium ICASA. *Agricultural Systems.* 49: 329-335.

Robert Eisberg and Robert Resnick. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, 2nd Edition.

Rouse, J.W., R.H. Haas, Jr., J.A. Schell, and D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. p. 309–317. In *Proc. ERTS-1 Symp.*, 3rd, Greenbelt, MD. 10–15 Dec. 1973. Vol. 1. NASA SP-351. NASA, Washington, DC

Running, S.W. and J.C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecol. Model.* 42:125-154.

Ryan, M.G. 1990. Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. *Can. J. For. Res.* 20:48-57.

Ryan, M.G. 1991. The effects of climate change on plant respiration. *Ecol. Applications* 1:157-167.

Sachdchina, T.M. y V.V. Dimitrieva. 1995. Leaf chlorophyll content and as possible diagnostic mean for the evaluation of plant nitrogen uptake from the soil. *Plant Nutr.* 18: 1427-1437.

Sands P.J. 1995. Modelling canopy production II. From single leaf photosynthetic parameters to daily canopy photosynthesis. *Australian Journal Physiology* 22: 593-601

Schlesinger, W.H. 1997. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press, Nueva York.

Minolta Co. (2006). *Chlorophyll Meter SPAD 502 Manual*. 23.p.

Spitters. C. J. T., Toussaint, H. A. J M., Goudriaan, J. 1986. Separating the diffuse and direct component of the global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part I. Components of Incoming radiation. *Agric. For. Meteorol.* 38: 217-229.

Spitters. C. J. T. 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. *Agric. For. Meteorol.* 38: 231-242.

- Schepers, J. S., T. M. Blackmer, W. W. Wilhelm, and M. Resende. 1996. Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *Journal of Plant Physiology* 148: 523–529.
- Steele, S.J., Gower, S.T., Vogel, J.G., Norman, J.M. 1997. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiol.* 17: 577-587.
- T. Endo, Y. Yasuoka y M. Tamura. 2001. Spatial estimation of biochemical parameters of leaves with hyperspectral imager. Paper presented at the 22nd Asian conference on Remote Sensing, 5-9 November 2001, Singapore.
- T. Endo, T. Okuda, M. Tamura and Y. Yasuoka. 2000. Estimation of Net Photosynthetic Rate based on In-Situ Hyperspectral Data, SPIE, proceedings of SPIE 4151, pp. 214-221.
- Taiz Lincoln y Eduardo Zeiger 2004. *Fisiología vegetal*. 3. ed. Porto alegre Artmed. 719 pp.
- Thornley, J. H. M. 2002. Instantaneous Canopy Photosynthesis: Analytical Expressions for Sun and Shade Leaves Based on Exponential Light Decay down the Canopy and an Acclimated Non-rectangular Hyperbola for Leaf Photosynthesis. *Annals of Botany* 89: 451-458.
- Tiba, C. e Leal, S. 2004. Medidas e modelagem da radiação PAR para o Nordeste do Brasil. *Anais do AGRENER 2004 (versão CD-ROM) – V Encontro de Energias no Meio Rural*, Campinas, San Pablo, Brasil.
- Tucker, Compton J. 1980. Relationship of Spectral Data to Grain Yield Variation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46(5):657-666.
- Turner, F.T. and M.F., Jund. 1994. Assessing the nitrogen requirements of rice crops with a chlorophyll meter method. *Aust. J. Exp. Agric.*, 34: 1001-1005.
- Walcroft, A.S., W.B. Silvester, D. Whitehead and F.M. Kelliher. 1997. Seasonal changes in stable carbon isotope ratios within annual rings of *Pinus radiata* reflect environmental regulation of growth processes. *Aust. J. Plant Physiol.* 24:57-68.
- Wardley, N.W., and P.J. Curran. 1984. The Estimation of Green Leaf Area Index from Remotely Sensed Airborne Multi-spectral Scanner Data, *International Journal of Remote Sensing*, 5(4):671-679.
- Wellburn, A. R. (1987). Plastids. *International Review of Cytology* 17, 149-210.
- Whittaker, R. H. 1975. *Communities and Ecosystems*. New York, New York: Macmillan Publishing Co. Wiegand, C.L. 1979. Leaf Area Index Estimates of Wheat from Landsat and Their Implications for Evapotranspiration and Crop Modeling, *Agronomy Journal*, 71(2):336-342.

Williams, J.R., C.A. Jones, J.R. Kiniry and D.A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32: 497-511.

Wood, C.W., P.W. Tracy, D.W. Reeves and K.L. Edmisted. 1992. Determination of cotton nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter. *J. Plant Nutr.* 15: 1435-1448.

Wood, C.W., D.W. Reeves and D.G. Himelrich. 1994. Relationships between chlorophyll meter reading and crop chlorophyll concentration, N status, and Yield: A review *Proc. Agron. Soc. New Zeland* 23: 1-9.

Anexos

Anexo 1. Calibración del espectroradiómetro LI-1800

1. Introducción

El espectroradiómetro LI – 1800 es un instrumento de medición espectral con un rango de sensibilidad que abarca desde 350 hasta 850 nm, y está diseñado para medir la distribución de potencia de diferentes tipos de fuente de luz, lo que permite realizar análisis cuantitativos y cualitativos de las propiedades ópticas de dichas fuentes (LI-COR. 2001).

Un espectroradiómetro, permite obtener datos de irradiancia espectral es decir datos de irradiancia por longitud de onda, y por consiguiente constituye la herramienta ideal para la cuantificación de parámetros biofísicos basados en la interacción entre la luz y el tejido foliar, que se pueden interpretar a partir de espectros de reflectancia o transmitancia de las plantas.

Estos parámetros biofísicos son:

- El coeficiente de transmitancia de hoja (m).
- Las concentraciones relativas de clorofila A .
- La radiación fotosintéticamente activa PAR incidente sobre el dosel de las plantas.
- La componente difusa de la radiación PAR incidente.

El LI – 1800 es la herramienta fundamental utilizada para la validación de varios de los parámetros biofísicos que forman parte del modelo de productividad primaria neta que presento en este trabajo. Este equipo, fue adquirido a principios de los años 90 y desde su adquisición no ha sido calibrado hasta la fecha. El uso, el tiempo y la falta de mantenimiento han llevado a que sobrestime los valores de irradiancia espectral, y por tal motivo se requiere calcular y considerar un coeficiente que escale y corrija los datos de irradiancia espectral que brinda el equipo.

La irradiancia espectral, ($Wm^{-2}nm^{-1}$) se refiere a la irradiancia en una longitud de onda dada por unidad de intervalo de longitud de onda. La irradiancia correspondiente a una región del espectro electromagnético incidente, se refiere a la integral de la irradiancia espectral con respecto a la longitud de onda en el ancho de banda determinado. Así por ejemplo, para el caso de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), se refiere a la radiación o mejor dicho la irradiancia espectral integrada en la región de 400 a 700 nm.

Así mismo, se considera que:

$$1 \text{ moldefotones} \equiv 1 \text{ Einstein} \equiv 6.022 * 10^{23} \text{ fotones}$$

2. Materiales

- 1 espectroradiómetro LI – 1800.
- 1 sensor cuántico lineal PAR LI – 191.

3. Metodología

Para la calibración del LI – 1800 se resolvió, comparar el valor de irradiancia PAR que brinda el sensor cuantico lineal LI 191, recientemente adquirido y calibrado por la empresa LICOR, y la irradiancia en el rango PAR que se obtiene del espectroradiómetro LI – 1800 a partir de integrar la irradiancia espectral por diferencial de longitud de onda desde 400 hasta 700 nm.

Las unidades de flujo que brinda tanto el LI – 1800 como el LI 191 son diferentes pero equivalentes y corresponden a $\text{umolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y Wm^{-2} respectivamente. Po lo tanto, para poder comparar los valores que brindan ambos equipos, se necesita conocer la relación que existe entre la cantidad de fotones incidentes por unidad de área y unidad de tiempo, expresados en $\text{umolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, que brinda el sensor cuántico lineal LI 191 y la energía por unidad de área y unidad de tiempo en Wm^{-2} que incide sobre el receptor coseno del espectroradiómetro LI – 1800, para finalmente hallar el factor que corrija los valores de irradiancia espectral que sobreestima el LI – 1800.

El ensayo se realizó a mediados de agosto del 2006, en las instalaciones del CIP de las localidades de Huancayo y San Ramón, ubicados a una altura de 3250 y 750 metros sobre el nivel del mar respectivamente. Se recopilaron simultáneamente datos de irradiancia solar utilizando el espectroradiómetro LI – 1800 y el sensor cuántico lineal PAR LI 191 en condiciones de cielo totalmente despejado, asegurándose de esta manera que los datos obtenidos por ambos equipos no varíen debido a las condiciones climáticas. Los datos recopilados por el espectroradiómetro fueron:

SR36 (localidad de San Ramón) y TR04 (localidad de Huancayo), del mismo modo simultáneamente se adquirieron datos de irradiancia en el rango PAR con el LI 191.

4. Cálculos y resultados

Para calcular la irradiancia solar que incide sobre el receptor coseno del LI – 1800 en el rango PAR, integramos los valores de irradiancia espectral (W_λ) desde 400 hasta 700 nm.

$$W_T = \int_{400}^{700} W_\lambda d\lambda \quad \dots (1)$$

Para una longitud de onda determinada el número de fotones por segundo es:

$$\text{fotones} * \text{s}^{-1} = \frac{W_\lambda}{E_{\text{foton}}} = \frac{W_\lambda}{hc/\lambda} \quad \dots (2)$$

Donde:

$$h = 6.62 * 10^{-34} \text{ J seg}$$

$$c = 3 * 10^8 \text{ m/seg}$$

$$[\lambda] = \text{nm}$$

Entonces el número total de fotones por segundo en el rango de 400-700 nm, resulta:

$$\frac{\#total - fotones}{segundo} = \int_{400}^{700} \frac{W_{\lambda}}{hc/\lambda} d\lambda \quad \dots (3)$$

Ahora si consideramos R , como la lectura del sensor cuántico en $umol \text{ seg}^{-1}m^{-2}$

Con:

$$1 \text{ umol } \text{seg}^{-1}m^{-2} = 6.022 * 10^{17} \text{ fotones } \text{seg}^{-1}m^{-2}$$

Entonces:

$$6.022 * 10^{17} * (R) = \int_{400}^{700} \frac{W_{\lambda}}{hc/\lambda} d\lambda \quad \dots (4)$$

Dividiendo (1) y (4):

$$\frac{W_T}{6.022 * 10^{17} * (R)} = \frac{\int_{400}^{700} W_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{700} \frac{W_{\lambda}}{hc/\lambda} d\lambda}$$

Factorizando y despejando W_T :

$$W_T = 6.022 * 10^{17} (Rhc) \frac{\int_{400}^{700} W_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{700} \lambda W_{\lambda} d\lambda} \quad \dots (5)$$

Según la ecuación (5), podemos observar que el factor de conversión será dependiente del tipo de fuente de emisión, específicamente función de su curva de distribución espectral (W_{λ} : $Wm^{-2}nm^{-1}$). Para resolver esta ecuación utilizamos sumatorias discretas, según:

$$W_T = 6.022 * 10^{17} (Rhc) \frac{\sum_i W_{\lambda_i} \Delta\lambda}{\sum_i \lambda_i W_{\lambda_i} \Delta\lambda} \quad \dots (6)$$

Donde:

$\Delta\lambda$: es cualquier intervalo de longitud de onda deseada.

λ_i : es la longitud de onda central en el intervalo $\Delta\lambda$.

W_{λ_i} : es la irradiancia espectral de la fuente ($Wm^{-2}nm^{-1}$), en la longitud de onda central λ_i .

$$W_T = 119.8R \frac{\sum_i W_{\lambda_i} \Delta\lambda}{\sum_i \lambda_i W_{\lambda_i} \Delta\lambda} \quad \dots (7)$$

Teniendo en cuenta que:

$$[R] = \text{umol } \text{seg}^{-1}m^{-2}$$

Para resolver la ecuación (7) utilizamos los datos recopilados con el espectroradiómetro LI – 1800 en la estación del CIP en San Ramón (SR36) y consideramos que:

$\Delta\lambda$: intervalo de longitudes de onda, con $\Delta\lambda = 1$

i : variando desde 1 hasta 301

$$\lambda_1 = 400 \text{ y } \lambda_{301} = 700$$

Remplazando las consideraciones mencionadas líneas arriba, en la ecuación (7) obtenemos que:

$$W_T = 119.8R \frac{3882734}{2203081182} Wm^{-2} = (0.211097297)R Wm^{-2} \quad \dots (8)$$

Finalmente de la ecuación (8), sabiendo que $[R] = \text{umol seg}^{-1}m^{-2}$, podemos relacionar las unidades de flujo W/m^2 y umol/m^2s , según:

$$1Wm^{-2} \approx 4.7372 \text{ umol seg}^{-1}m^{-2} \quad \dots (9)$$

Ahora, para calcular el factor que corrija los datos de irradiancia espectral que sobrestima el espectroradiómetro LI – 1800, compararemos los valores de PAR del LI – 1800 y el LI 191 recopilados en la estación CIP de Huancayo. Primero transformaremos el valor de irradiancia PAR obtenido por el sensor cuántico lineal LI 191 de $\text{uEm}^{-2}s^{-1}$ a Wm^{-2} , según (9):

$$\text{Irradiancia PAR (LI 191)}_{\text{Huancayo}} = 2100 \text{ umol m}^{-2}s^{-1}$$

$$\text{Irradiancia PAR}(Wm^{-2}) = 2100 \text{ umolm}^{-2}\text{Seg}^{-1} * \frac{1Wm^{-2}}{4.7372 \text{ umol m}^{-2}\text{Seg}^{-1}}$$

$$\text{Irradiancia PAR}(Wm^{-2})_{\text{Huancayo}} = 443.3043 Wm^{-2} \quad \dots (10)$$

A continuación, consideramos el rango PAR de los datos obtenidos con el espectroradiómetro LI – 1800 en la localidad de Huancayo (dato TR04), los cuales fueron adquiridos simultáneamente con el radiómetro PAR LI 191 y cuyo valor se muestran en (10), y lo integramos desde 400 hasta 700 nanómetros para obtener la irradiancia en el rango PAR.

$$W_{TR04}(400 - 700 \text{ nm}) \approx \sum_i W_i \Delta\lambda = 14359568 \quad \dots (11)$$

Es evidente que las ecuaciones (10) y (11) deben ser equivalentes. Por lo tanto el factor de corrección ($f_{\text{correccion}}$) para los datos de irradiancia espectral del espectroradiómetro LI – 1800 resulta:

$$f_{\text{corrección}} = \frac{443.3043}{14359568} = 3.0871 * 10^{-5} \quad \dots (12)$$

Este factor debe ser aplicado a cada uno de los valores de irradiancia espectral del espectralradiómetro.

La Respuesta espectral del espectralradiómetro LI – 1800 a luz natural incidente, para un cielo completamente despejado (localidad de San Ramón), se aprecia en la Figura 54. El grafico de la izquierda representa la irradiancia espectral sobrestimada con un valor máximo de irradiancia espectral de $5 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{nm}$, mientras que el grafico de la derecha corresponde al espectro de potencia considerando el factor de corrección calculado líneas arriba, con un valor máximo de irradiancia espectral de $1.6 \text{ W/m}^2\text{nm}$.

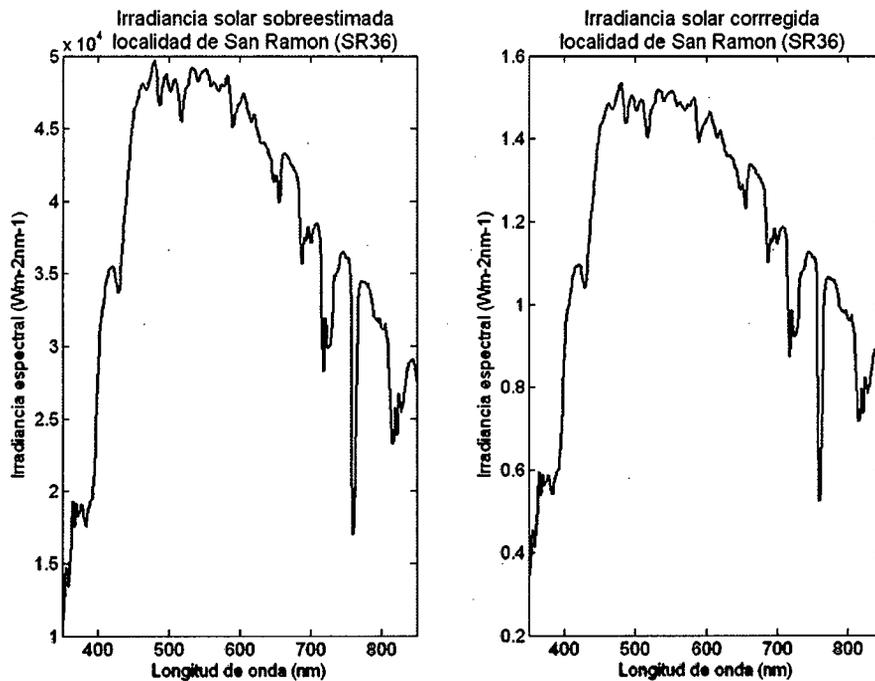


Figura 54. Respuesta espectral del espectralradiómetro LI-1800.

Es importante destacar que en ambas figuras se puede apreciar la sensibilidad del equipo en todo su rango de longitudes de onda, ya que se logra observar las trazas correspondientes a absorciones de luz en regiones específicas del espectro electromagnético debido a la presencia de componentes atmosféricos como el O_2 , CO_2 , vapor de agua, aerosoles, etc., además de patrones típicos como resulta el máximo pico de irradiación en $\lambda = 525 \text{ nm}$ correspondiente al color verde, y que representa la máxima irradiancia espectral del espectro solar incidente.

5. Conclusiones

El coeficiente de conversión entre las unidades de flujo W/m^2 y $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$, resulta únicamente función de la curva de distribución espectral de la fuente de emisión, como se demuestra en la ecuación (5).

El factor que convierte unidades de flujo W/m^2 a $\mu\text{mol/m}^2\text{s}$ para condiciones de luz natural en el rango PAR según K.J. McCree 1981, resulta aproximadamente 4.6. Sin embargo para otros tipos de fuentes de luz se tiene proporciones de energía diferente en el rango PAR, lo cual resulta en factores de conversión ligeramente diferentes, como por

ejemplo para el caso de luz incandescente o sodio a alta presión se tiene un factor de 5. En nuestro ensayo, considerando al sol como nuestra única fuente de emisión, se obtuvo un coeficiente de conversión de 4.7, valor que se aprecia en la ecuación (9), resultando una excelente aproximación con un error de + 2.17 % respecto a la referencia mencionada líneas arriba.

El coeficiente de corrección para los datos de irradiancia espectral por longitud de onda que brinda el espectralradiómetro LI – 1800, resulta $3.0871 * 10^{-5}$, según (12). Este factor debe multiplicarse a cada valor de irradiancia espectral en el rango PAR de longitudes de onda del LI – 1800, ya que permite escalar los valores de irradiancia espectral que sobrestima el equipo hacia valores correctos. Este factor resulta válido siempre y cuando el sensor que colecciona irradiación en el LI – 1800 conserve la sensibilidad espectral para cualquier longitud de onda correspondiente al rango desde 400 hasta 700 nm.

Los espectros de transmitancia o reflectancia de plantas como la papa, obtenidos por intermedio del LI – 1800 a través de la interacción entre la luz y el tejido vegetal, permiten resumir características de las plantas, a través del uso de índices o coeficientes obtenidos de dichos espectros y que pueden representar la condición o el periodo vegetativo de una planta.

Anexo 2. Estimando concentraciones de clorofila A utilizando el clorofilometro SPAD-502

1. Introducción

La cantidad de energía solar absorbida por una hoja es en gran parte función de la concentración foliar de pigmentos fotosintéticos; entonces bajas concentraciones de clorofila pueden directamente limitar el potencial fotosintético y por lo tanto la producción primaria de una planta (Curran *et al.*, 1990; Filella *et al.*, 1995). La clorofila es el pigmento fotorreceptor responsable de la primera etapa en la transformación de energía solar en energía química y, consecuentemente, la molécula responsable de la existencia de vida superior en la tierra. Existen cuatro clases de clorofila, de la A a la D, de las cuales la clorofila A es la más abundante, de aquí su importancia en el aparato fotosintético y por consiguiente para los modelos de fotosíntesis. La mayor cantidad del nitrógeno en las hojas está incorporado en la clorofila, por tal razón cuantificando el contenido de clorofila obtendremos una medida indirecta del nivel de nutrientes de la hoja (Filella *et al.*, 1995; Moran *et al.*, 2000). En este modelo de simulación de fotosíntesis de follaje de plantas C3 como la papa, a que se hace referencia en el capítulo 3, el contenido de clorofila A de las hojas se incluye en el parámetro *m*, transmitancia de hoja, y es un indicador del estado fenológico y la capacidad fotosintética de las hojas.

La técnica más ampliamente utilizada para la determinación de clorofila en tejidos vegetales se basa en la extracción de clorofila con acetona al 80 % o con N, N dimetilformamida (Moran, 1982) que es un método utilizado para estimar el estado nutricional del cultivo en lo que se refiere al nitrógeno, magnesio y hierro principalmente (Sachdchina y Dimitrieva, 1995). No obstante, tiene el inconveniente de requerir equipo especializado y, cuando se tiene un gran número de muestras para analizar, el gasto de reactivos es excesivo, lo que ocasiona que el costo de la determinación sea alto (Wood *et al.*, 1994). Otro de los inconvenientes es el tiempo invertido desde la adquisición de la muestra hasta su preparación y análisis.

Sin embargo, se ha reportado que la cantidad de clorofila y de nitrógeno total determinados por los métodos tradicionales en leguminosas, gramíneas, frutales y hortalizas presenta una alta correlación con las unidades SPAD medidas con el detector de clorofila Minolta SPAD-502. (Reeves *et al.*, 1993). Turner y Jund (1994), con un detector de clorofila SPAD-502, demostraron que la "unidad SPAD" es un valor proporcional al contenido de nitrógeno en la planta de arroz. Dichos autores analizaron *in situ* y en corto tiempo, decenas de muestras sin destruirlas lo que les permitió establecer de forma inmediata el estado nutrimental del cultivo en estudio. Posteriormente, el equipo SPAD-502 fue calibrado para el cultivo de maíz (Krugh *et al.*, 1994), trigo (Follet *et al.*, 1992; Fox *et al.*, 1994), pasto (Festuca) (Kantety *et al.*, 1996) y algodón (Wood *et al.*, 1992), con el fin de detectar posibles deficiencias de nitrógeno.

Los valores estimados por el medidor de clorofila SPAD-502 corresponden a la cantidad de clorofila presente en la hoja por unidad de área. Estos valores son calculados con base en la cantidad de luz absorbida a través de la hoja para dos longitudes de onda, en el rojo específicamente en 650 nm y en el infrarrojo en 950 nm aproximadamente, regiones del espectro en los que la absorbancia de la clorofila es diferente (Minolta Co., 2006), como se puede apreciar en la Figura 55.

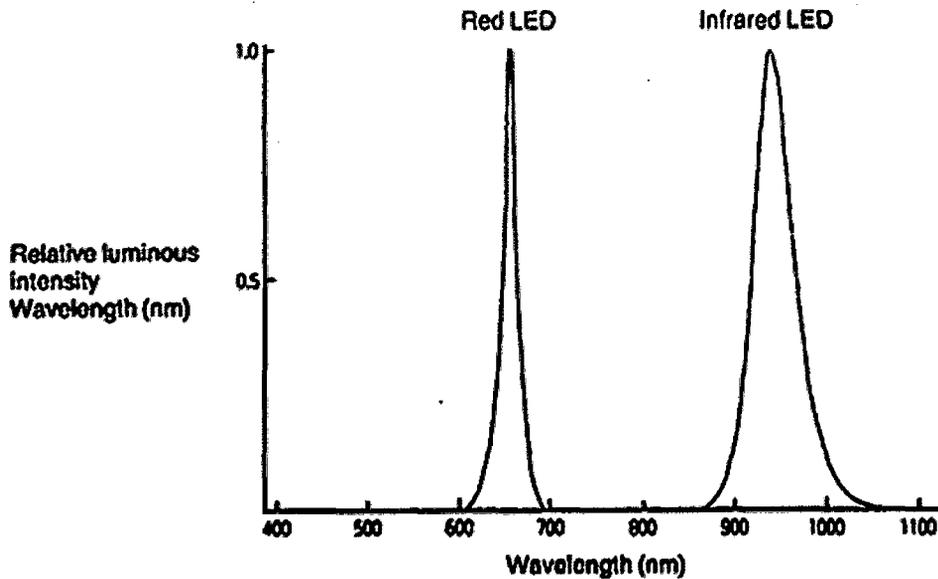


Figura 55. Características ópticas del Minolta SPAD-502 (Minolta Co., 2006).

La cantidad de luz capturada por el sensor del SPAD-502, es inversamente proporcional a la cantidad de luz utilizada por la clorofila, la señal es procesada, y la absorbancia es cuantificada en valores dimensionales que van de 0 a 199, por lo que las unidades SPAD serán siempre las mismas de acuerdo con el tono verde de las hojas (Krugh *et al.*, 1994).

2. Materiales

- Minolta SPAD-502.
- 10 repeticiones de papa, variedad Canchán.
- Acetona al 80%.
- Espectrofotómetro.
- Nitrógeno líquido.
- Sacabocados.
- Tubos de ensayo y morteros.

3. Metodología

El experimento se estableció en el invernadero #8 en las instalaciones del CIP-Lima, donde se sembraron plantas de papa de la variedad Canchán. Luego de 8 semanas después de la siembra, se seleccionaron folíolos de papa que presentaban desde clorosis severa hasta un color verde intenso y se agruparon en intervalos de lectura que abarcaban de 25 a 29, 30 a 34, 35 a 39 y 40 a 45 unidades SPAD, realizándose 3 lecturas por hoja, como lo recomiendan Krugh *et al.* (1994) y obteniéndose el promedio de 3 lecturas por intervalo (ver Figura 56). Inmediatamente después, por intermedio de un sacabocados, las hojas fueron cortadas en fragmentos de 1 cm^2 aproximadamente, teniendo en cuenta conservar una relación área y peso aproximadamente constante entre los fragmentos correspondientes a cada intervalo de unidades SPAD, para finalmente ser conducidas al laboratorio y determinar su contenido de clorofila A por extracción con acetona al 80%.

Agrupar las hojas por intervalos de valores SPAD permitió abarcar todas las tonalidades de verde de las hojas de papa. La cuantificación de clorofila A se realizó mediante el método de Arnon, publicado por Bruinsma (1963), el cual consiste en:

- Pesar aproximadamente 0.3-0.5 gramos de material vegetal fresco.
- Moler el material en nitrógeno líquido.
- Extraer 1.5 ml de acetona fría al 80 % en un tubo Eppendorf de 2 ml.
- Centrifugar inmediatamente a alta velocidad (el material vegetal debería ser sedimentado pero no compactado).
- Colectar la acetona, protegida de la luz para evitar la degradación de la clorofila.
- Recuperar el polvo residual con 1.5 ml de acetona al 80 %.
- Combinar los extractos.
- Medir la absorción del extracto en un fotómetro en 663 y 646 nm.

La cuantificación de clorofila A, se realizó reemplazando las lecturas del espectrofotómetro en la siguiente ecuación:

$$\text{Clorofila A (ug/ml)} = 12.21 * A_{663} - 2.81 * A_{646} \quad \dots (1)$$

Donde:

A_{663} y A_{645} : Absorbancia del extracto de clorofila en las longitudes de onda 663 y 645 nm respectivamente.

Con las lecturas del clorofilómetro Minolta SPAD-502, ver Figura 56, y los resultados del análisis de extracción de clorofila con acetona al 80% que se observa en la ecuación (1), se elaboró una ecuación para estimar concentraciones de clorofila A por unidad de masa de hojas a partir de unidades SPAD (ver Figura 57).



Figura 56. Clorofilómetro Minolta SPAD-502.

4. Análisis y resultados

Para comparar gramos de clorofila por unidad de masa de hoja con gramos de clorofila por unidad de área se necesita establecer y mantener una relación área-peso aproximadamente constante. Para dicho propósito se utilizó el mismo número de discos por cada intervalo de valores SPAD y así obtener una equivalencia entre los gramos de clorofila A por unidad de masa que se obtienen con la extracción de clorofila A con acetona al 80% y los gramos de clorofila por unidad de área que se determinan con el Minolta SPAD 502.

Para cada intervalo de valores SPAD se utilizaron 3 discos de 1cm² que promediados en peso permitían obtener una muestra de aproximadamente 0.5 gr. de hoja que luego se liofilizaron completamente en nitrógeno líquido, antes de ser sumergidas en acetona y finalmente sometidas al espectrofotómetro.

Tabla 7. Valores SPAD promedio y valores de absorbancia de luz del extracto de clorofila en 663 y 646 nm respectivamente.

Intervalo de valores SPAD	Valor SPAD (promedio)	Absorbancia 663 nm	Absorbancia 646 nm
25 a 29	26.45	0.26	0.3545
30 a 34	31.95	0.348	0.169
35 a 39	36.81	0.4175	0.1895
40 a 45	41.66	0.5403	0.245

Las concentraciones de clorofila A extractable en acetona al 80% de hojas de papa de la variedad Canchán, mostraron tener una alta correlación, altamente significativa ($R^2 = 0.98$ y $\alpha = 0.098$) con los valores obtenidos del Minolta SPAD-502 (ver Figura 57), lo cual representa una gran ventaja ya que permitiría sustituir los métodos tradicionales de cuantificación de clorofila, por rápidas lecturas de valores SPAD.

Correlación entre los valores Spad y las concentraciones de clorofila A

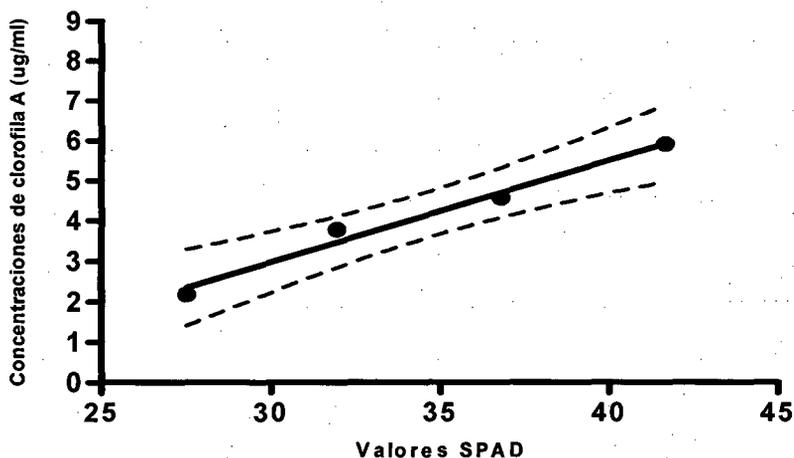


Figura 57. Valores SPAD vs concentraciones de clorofila A – variedad Canchán

$$\text{Clorofila A (ug/ml)} = 0.252 * \text{Spad} - 4.612 \quad \dots (4.1 - 2)$$

$R^2 = 0.9808$
 $P \text{ value} = 0.098 \text{ (significativo)}$

5. Conclusiones y discusiones

De forma similar a los trabajos realizados por Turner y Jund (1994) en arroz, Krugh *et al.*, (1994) en maíz, Follet y Wood *et al.*, (1992) para algodón, etc., se encontró una alta correlación entre los valores SPAD y las concentraciones de clorofila A por unidad de masa en hojas de la variedad de papa Canchán, obteniéndose un coeficiente de determinación de 0.98, lo que implica que a partir de la ecuación (4.1 – 2) que se muestra líneas arriba y los valores que brinda el Minolta SPAD-502, es posible estimar contenidos de clorofila A por gramo de hoja fresca en hojas de papa de la variedad Canchán con una eficiencia del 98%.

El principio de funcionamiento del Minolta SPAD-502 consiste en medir la cantidad de luz que se transmite a través de la lámina foliar, por lo tanto para realizar comparaciones se debe considerar que las hojas que se están evaluando presenten espesores similares. Por esta razón, es necesario realizar diferentes ensayos que permitan construir ecuaciones de regresión para cada variedad y en diferentes etapas fenológicas de la planta, ya que la condición o el estado de la hoja serán función no solo de la variedad sino que también de la edad del cultivo.

El rango de trabajo ideal que encontramos en el Minolta SPAD-502 durante el ensayo, es el que corresponde de 25 a 50 unidades SPAD, ya que se observó que valores SPAD superiores a 60, presentaron una baja o escasa sensibilidad al estado de la hoja. Resultados similares se obtuvieron para valores inferiores a 25.

El Minolta SPAD-502 permite realizar medidas rápidas del contenido de clorofila de una hoja, permitiendo evaluar periódicamente la condición de una hoja. Pero si nuestro objetivo es evaluar un gran número de hojas correspondiente a un número elevado de repeticiones por variedad de planta, necesitaríamos de un mayor número de personas y equipos, lo que incrementarían los costos y el tiempo de ejecución. Para estos casos, puede resultar conveniente, utilizar la información que se puede obtener a partir de datos de reflectancia, como pueden ser imágenes o fotos obtenidas desde una cámara fotográfica o algún equipo de radiometría, que permita abarcar una gran área, y utilizar un criterio similar de análisis al del Minolta SPAD-502, es decir considerar la interacción del tejido vegetal con la luz en zonas específicas del espectro electromagnético. Para estos casos, utilizar la luz que reflejan las plantas puede resultar una herramienta práctica y eficiente.