

ISSN 0104-1347

Determinación del área foliar en papa (*Solanum tuberosum* L., var. Spunta) por medio de fotografías digitales conociendo la relación entre el número de píxeles y la altura de adquisición.

Determination of the leaf area in potato (*Solanum tuberosum* L., var. Spunta) by means of digital pictures knowing the relationship between the pixels number and the height of acquisition.

Angel Rodríguez¹, Antonio Carlos de la Casa², Luciano Bressanini³, Ricardo Accietto⁴ y Gustavo Ovando⁵

Resumen - Las mediciones directas del Índice de Área Foliar (IAF) han sido históricamente difíciles de realizar en papa. Las hojas son particularmente irregulares y por lo tanto la estimación de su área requiere de un procedimiento meticuloso. Además, es común que se susciten cultivos desperejados; razón por la cual es necesario trabajar con mucho material. Basado en estas limitaciones se propone la búsqueda y puesta a punto de un procedimiento de cuantificación del área foliar que reúna las siguientes características: a) permitir el análisis de muestras representativas, b) efectuar un procesamiento inmediato y c) poseer practicidad operativa. Se detalla el método propuesto como así también las variantes operativas probadas para la determinación fotogramétrica digital del área foliar, que presenta como novedad el tratamiento de las imágenes por medio de un software de clasificación. Su capacidad de estimación es evaluada frente a un método de medición estándar. Habiendo constatado que la determinación fotogramétrica a partir de una proporción pixel/superficie conocida subestima sistemáticamente el valor observado con el integrador de área, se aplicó una variante a partir de la relación entre el número de píxeles clasificados como hoja y la altura de adquisición. El método propuesto resultó equivalente al del integrador, según se aprecia analizando la regresión entre los respectivos registros ($R^2 = 0,99$; $p < 0,001$). El error porcentual medio respecto de los valores observados es de $-3,62\%$ con una desviación estándar de $5,14\%$. El modelo presentado como alternativa se basa en la relación lineal que para cada altura se establece entre el número de píxeles clasificados como hoja y los registros de área foliar observados.

Palabras clave: papa, área foliar, fotografía digital, máxima verosimilitud, altura de la foto.

Abstract - Direct measurements of Leaf Area Index (LAI) have been historically difficult of carrying out in potato. The leaves are particularly irregular and therefore the estimate of its area requires of a reliable procedure. Also, it is common that uneven cultivations of potato are raised; for which reason is necessary to work with a lot of plants. Based on these limitations it was searched a procedure of quantification of leaf area with the following characteristic: a) to allow the analysis of representative samples, b) to make an immediate prosecution and c) to possess operative facility. The proposed technique is detailed and another operative variants tested for the determination digital fotogrametric of the leaf area, showing as novelty the treatment of the images by means of a classification software. Their estimate capacities are evaluated in front of a method of standard mensuration. Having verified that the fotogrametric assessment using a well-known proportion pixel/area systematically underestimates the observed measure with the a commercially available instruments, an alternative method was applied based on the relationship among the pixels number classified as leaf and the height of picture acquisition. The proposed method was equivalent to integrativa instrument, as it is appreciated analyzing the regression among the respective values ($R^2 = 0,99$; $p < 0,001$). The mean percentual error regarding the observed values is of $-3,62\%$ with a standard deviation of $5,14\%$. The model presented as alternative method is based on the lineal relationship among the quantity of pixels classified as leaf and the leaf area registrations for each height observed.

Keys words: potato, leaf area, digital photographs, maximum likelihood, height of the picture

¹ Ing. Agr. Profesor Titular de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas – Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba. arodrigu@agro.uncor.edu

² Ing. Agr. Profesor Adjunto de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas – Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba. - delacasa@agro.uncor.edu

³ Ing. Agr. Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Agrotecnia – Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba. lubressa@agro.uncor.edu

⁴ Ing. Agr. Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Agrotecnia – Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba. accietto@agro.uncor.edu

⁵ Ing. Agr. Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas – Facultad de Ciencias Agropecuarias – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba. gugovan@agro.uncor.edu

Introducción

En virtud de su implicancia en el crecimiento de los cultivos, el índice de área foliar (IAF) es un parámetro clave, habitualmente empleado por los diseñadores de sistemas orientados al desarrollo de modelos de simulación. Algunos ejemplos de estas herramientas utilizadas ampliamente en investigación básica y aplicada, son los programas de cultivo que componen la serie DSSAT v3.1 (UEHARA *et al.*, 1994) y SUCROS (VAN KEULEN *et al.*, 1982; SPITTERS *et al.*, 1989). En el primer caso, la rutina de cálculo de la productividad primaria potencial del cultivo de papa se integra a partir del concepto de eficiencia en el uso de la radiación (MONTEITH, 1977). Tanto la función de intersección de la radiación, como el cálculo de la lámina de agua evapotranspirada, que sigue el procedimiento descrito por RITCHIE (1972), son procesos controlados por el IAF.

Un aspecto operativo de particular interés corresponde a la determinación y cuantificación del área foliar de un cultivo, tanto para el desarrollo y utilización de estos modelos, como así también en el trabajo agronómico experimental de diversas disciplinas, incluyendo las referidas a teledetección (MAAS, 1988; BEVERLY & VANIERSEL, 1998).

Entre los procedimientos indirectos de medición del área foliar existen distintas alternativas, como son: el integrador de señal luminosa (GORDON *et al.*, 1994), scanner manual (TSONEV & SERGIEV, 1993) y método de spray foliar (KORVA & FORBES, 1997) entre otros.

También han sido desarrollados procedimientos de estimación que emplean para este fin dimensiones características de la hoja. El carácter específico de las funciones se da como consecuencia de las diversas formas foliares y detalles morfológicos propios de cada especie vegetal. En el caso de algodón, ricino y sorgo se ha empleado el largo y ancho de la lámina para efectuar la estimación (ASHLEY *et al.*, 1963, WENDT, 1967). EPSTEIN y ROBINSON (1965) aplicaron similar criterio en papa, especie con hojas pinaticompuestas. Para hojas doble pinaticompuestas, como es el caso de *Prosopis glandulosa* var. *glandulosa*, WENDT *et al.* (1967) trabajaron de igual forma.

La fotogrametría es una técnica de creciente aplicación en la evaluación de aspectos agronómicos. Así, el empleo de métodos fotográficos ha sido utilizado con buenos resultados entre otras cosas para la cuantificación de la porosidad de cortinas rompevientos, discriminando el área cubierta del espacio abierto (KENNEY, 1987). También, se

analizaron fotografías aéreas para establecer la condición de estrés de nitrógeno en maíz (BLACKMER *et al.*, 1996). Recientemente, LEE (1997) utilizó técnicas fotogramétricas para realizar estudios no destructivos en poblaciones de *Zostera japonica* Aschers. & Graebn., consistentes en estimaciones del porcentaje de cobertura, biomasa e índice de área foliar.

Por otra parte, un aspecto crucial en el trabajo de campo se refiere a determinar el tamaño y el sitio de extracción de la muestra. Desde el punto de vista estadístico, se puede aceptar como criterio general que la dimensión de la muestra o número de repeticiones debe crecer a medida que disminuye la homogeneidad del lote. De todos modos, la precisión de la determinación y la consecuente búsqueda de seguridad estadística exige rescatar siempre una muestra representativa, lo cual se traduce en un trabajo de laboratorio engorroso debido a la abundancia del material a procesar.

En papa las mediciones directas de área foliar han sido históricamente difíciles de realizar (GORDON *et al.*, 1994). Las hojas son particularmente irregulares y por lo tanto la estimación de su área requiere un procedimiento minucioso. Además, es común que se susciten cultivos desaparejos por diversas causas: fallas en la plantación, defectos en la semilla, más de un tallo por casco o que éstos se presenten muy ramificados; razón por la cual es necesario trabajar con mucho material.

Dados los inconvenientes experimentados en ensayos anteriores para obtener este parámetro, se propone como objetivo la búsqueda y puesta a punto de un procedimiento de cuantificación del área foliar. Entre las principales directrices seguidas para el desarrollo de la técnica se destacan la capacidad de procesar muestras representativas, su practicidad operativa y el procesamiento inmediato.

Material y Métodos

La alternativa metodológica desarrollada consistió en la determinación fotogramétrica digital del área foliar, apoyada en procedimientos estándar de interpretación de imágenes adquiridas mediante teledetección. Este documento detalla el método propuesto y sus variantes aplicadas en papa presentando como novedad el tratamiento de las fotografías digitales por medio de un software de clasificación. Se explican los aspectos relevantes de las alternativas propuestas y su evaluación frente a un método de medición estándar. Además, se analizan

distintos aspectos referidos a la obtención de la imagen fotográfica, en particular la influencia de la altura de adquisición, a los efectos de evaluar la precisión de la determinación y analizar las virtudes y defectos de la técnica.

La determinación fotogramétrica del área foliar se realizó inicialmente siguiendo la metodología de OVANDO et al. (1999) a partir de fotos digitales de material fresco. Con el propósito de agilizar el método el procedimiento fue programado a los efectos de clasificar la totalidad de las imágenes en forma múltiple a partir de un único sitio de entrenamiento. En cada muestra se colocó una figura cuadrada de color rosado de superficie conocida (81 cm²) para efectuar el cálculo del área foliar (AF).

El procedimiento de clasificación de las imágenes programado al efecto fue el de máxima verosimilitud basado en la teoría de Bayes (SACHS, 1978; EASTMAN, 1997) por el cual se asigna *a priori* la misma probabilidad de ocurrencia a cada clase. El análisis realizado permitió derivar un método alternativo mediante el cual es posible independizarse de la proporción conocida pixel/superficie rosada. Para ello, fueron tomadas fotografías digitales con una cámara Kodak DC40 sobre seis muestras foliares de papa a distintas alturas (64, 84, 104, 124, 144, 164, 184, 200, 220 y 240 cm). En forma paralela se determinó el área foliar del material por medio de un integrador de área marca Licor 3000.

El procedimiento digital utilizado inicialmente consistió en identificar automáticamente los tres componentes que integran la fotografía (fondo, hoja y referencia) y cuantificar la proporción de hoja respecto a la referencia para cada imagen (OVANDO et al., 1999).

Para tal fin se separó una imagen de 24 bit en los tres canales que la componen en el sistema RGB (Red, Green and Blue), fijando en uno de ellos los sitios de entrenamiento para luego clasificar la imagen.

Resultados y Discusión

En la Figura 1 se presentan las observaciones del área foliar obtenidas mediante el integrador de área como así también el número de pixeles correspondientes a la clase hoja de las imágenes adquiridas a distintas alturas. Se puede advertir que la cantidad de pixeles decrece con el aumento progresivo de la altura de la fotografía, y también a medida que se reduce la cantidad de material procesado.

Se observa en la Figura 1 la variación que experimenta el número de pixeles clasificados como

hoja con relación a la altura de la toma fotográfica. En esta relación se puede apreciar que el incremento de la altura se traduce en una disminución significativa del número de pixeles clasificados. A mayor altura, por otra parte, se registra escasa variación debido al AF de la muestra. Como consecuencia de esto, en las fotos más cercanas, la cantidad de pixeles aumenta considerablemente incrementando asimismo el tiempo necesario para su procesamiento. Además, la cantidad de material que puede ser evaluado de esta manera es muy reducida, necesitando tomar mayor número de fotografías para completar una superficie equivalente. En caso contrario, cuando la altura de la foto supera los 160 cm, el tiempo de procesamiento no se modifica substancialmente a pesar del diferente tamaño de las muestras y se puede procesar mayor AF.

También la relación entre la cantidad de pixeles clasificados como rosado y la altura es inversa, lo cual explica porqué la determinación del área foliar no acusa el aumento de su error al obtenerse las tomas desde posiciones más elevadas.

En la Figura 2 se muestra el error porcentual obtenido como la diferencia entre las observaciones y las estimaciones (referido a las observaciones) de área foliar para cada altura evaluada. En promedio la subestimación oscila alrededor del 12,12%. No se advierte un comportamiento definido del error con relación a la altura, a pesar que la definición de la imagen se reduce progresivamente y las imágenes clasificadas correspondientes a mayores alturas exhiben a simple vista una apariencia desvirtuada de los objetos.

De la clasificación por altura, entre la cantidad de pixeles reconocidos como área foliar y el área foliar observada, es posible deducir una relación general para la estimación del AF, sin tener en cuenta el valor de una referencia conocida de la imagen, como en el caso anterior. Este procedimiento es presentado en la Figura 3, donde se advierte la variación que experimenta la pendiente de la relación múltiple. A menor altura la pendiente de la relación es menor, lo que se traduce en una incidencia menor del error de clasificación. Este se torna más peligroso a mayor altura porque un ligero cambio del número de pixeles clasificados como hoja produce un importante y relativamente mayor incremento del AF.

A los efectos de analizar la variación de las intersecciones y pendientes de las relaciones lineales entre AF y el número de pixeles clasificados como hoja, con respecto a la altura de adquisición, se presenta la Figura 4. Mientras las ordenadas al origen de las rectas de regresión lineal para las distintas al-

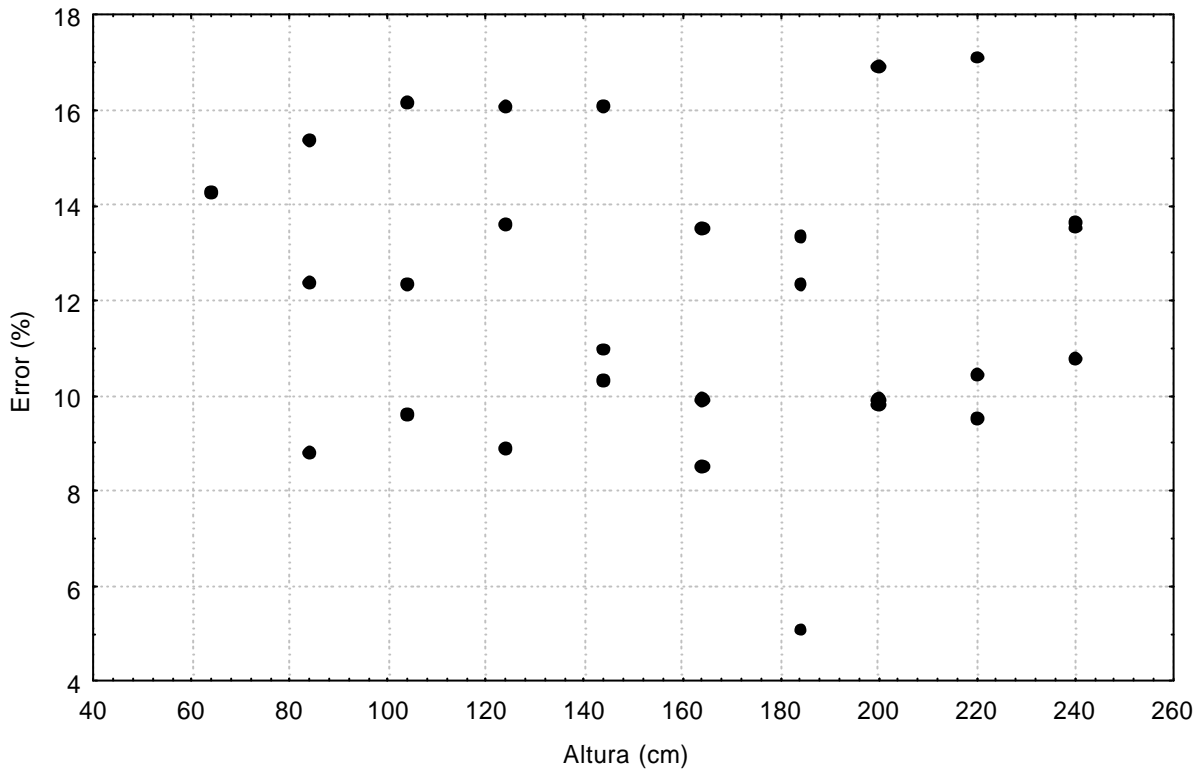


Figura 1. Diagrama de dispersión entre el número de píxeles clasificados como hoja y la altura a la que fue tomada la fotografía para seis muestras de distinto tamaño.

turas no presentan un comportamiento definido, la variación de la pendiente puede ser representada fielmente por una función cuadrática de ajuste tomando como variable independiente sólo a la altura de la

fotografía. Además, su contribución excluyente en la ecuación de estimación cuando el material procesado es abundante, se evita el uso de la ordenada al origen en el procedimiento.

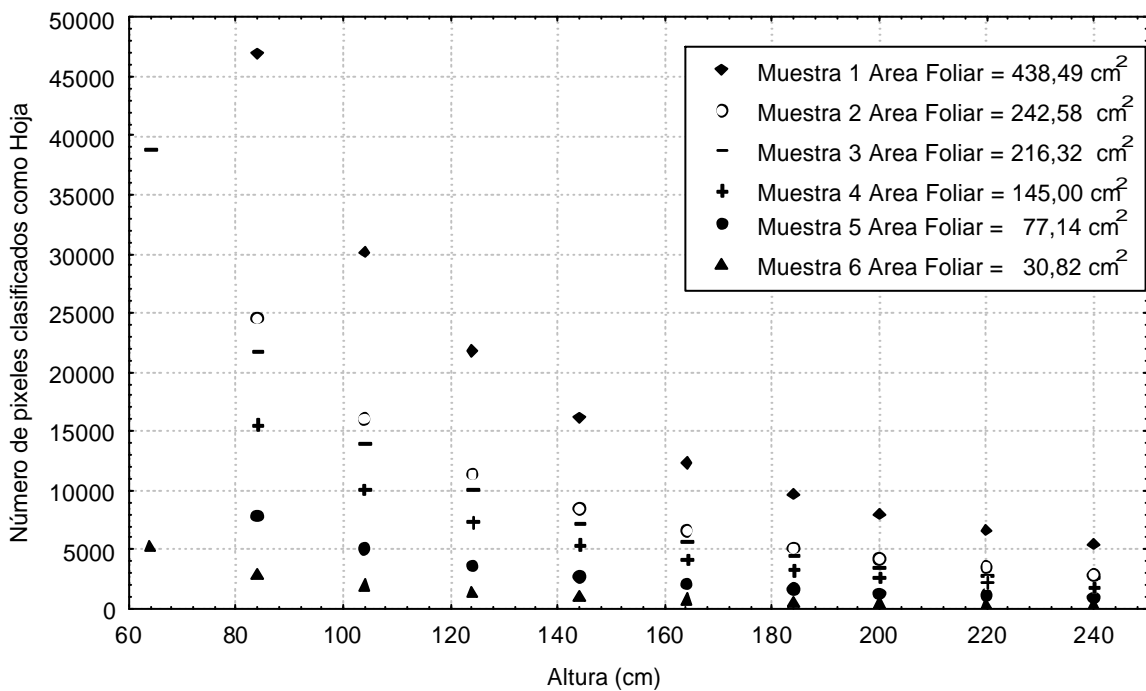


Figura 2. Error porcentual entre las observaciones de área foliar y las determinaciones fotogramétricas obtenidas a distintas alturas por el método de la superficie de referencia.

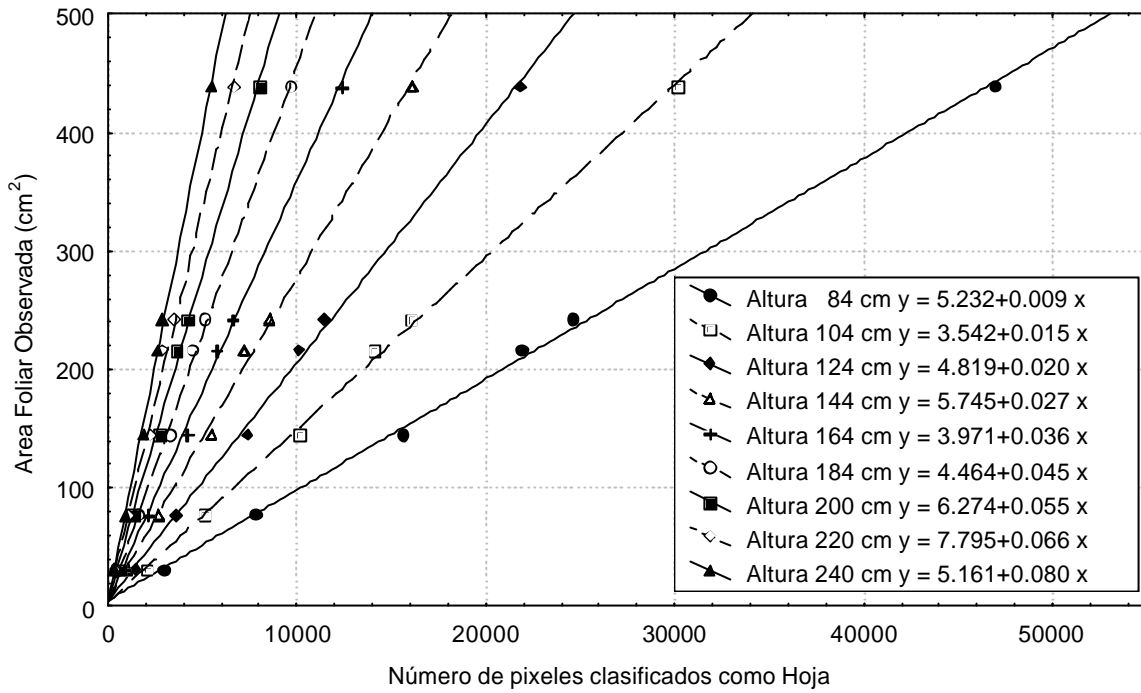


Figura 3. Relaciones lineales entre el número de píxeles clasificados como hoja y el área foliar observada para las distintas alturas consideradas.

En virtud de la importancia excluyente que presenta la relación entre la superficie foliar y el número de píxeles clasificados, y habiendo constatado su precisión, se efectuó el análisis del error cometido en la determinación del área foliar conocido el número de píxeles clasificados y la altura de toma fotográ-

fica. De esta forma es posible independizarse de emplear la proporción conocida de otro elemento de la imagen.

La evaluación estadística de esta relación presenta un R^2 de 0,9964 reflejando la bondad del modelo. El error porcentual promedio en este caso es

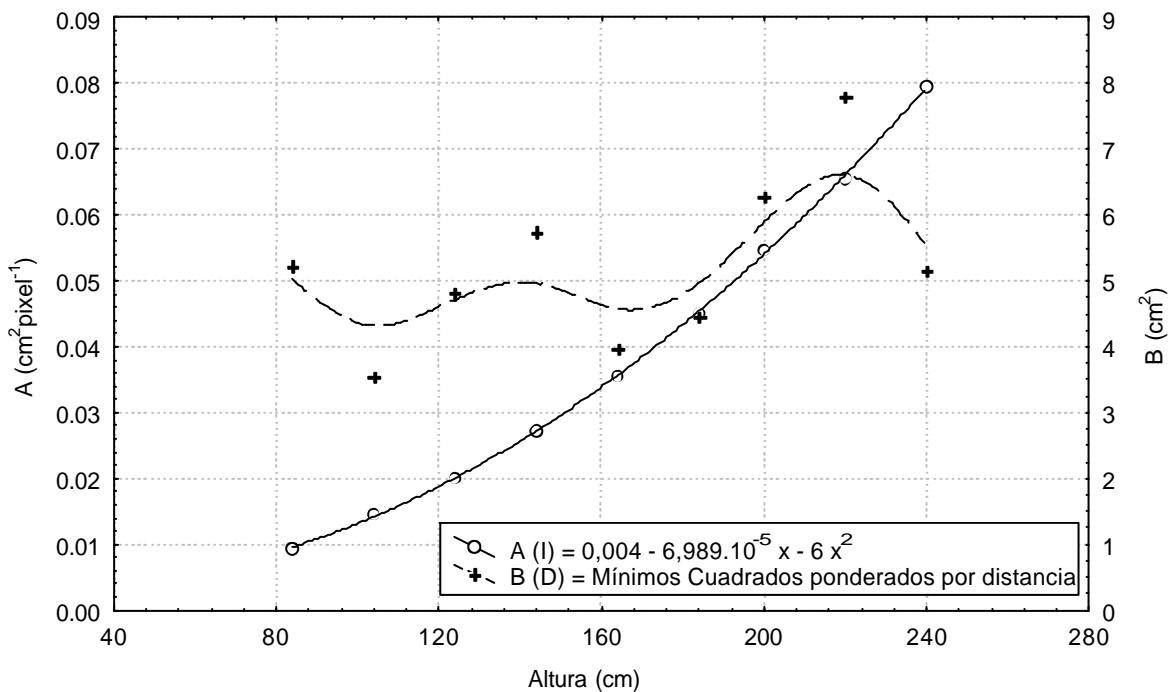


Figura 4. Variación que experimentan con respecto a la altura, la pendiente (A) y la ordenada al origen (B) de la relación lineal entre el número de píxeles clasificados como hoja y el área foliar observada.

de $-3,62\%$ con un desvío estándar que asciende a $5,14\%$, y no muestra una tendencia definida, según se aprecia en la Figura 5.

Como vemos se presentan dos métodos alternativos para estimar el AF del cultivo de papa a los efectos de determinar el IAF conociendo la superficie unitaria del terreno del cual se extrae el material. El primer procedimiento requiere incorporar a la imagen una figura de superficie conocida con el propósito de obtener la proporción de píxeles/superficie de referencia. De esta forma el procedimiento es independiente de la altura de adquisición de la fotografía, si bien se ha constatado que la disminución del número de píxeles clasificados reduce la capacidad de discriminar entre los elementos de la imagen, en particular cuando el sitio de entrenamiento no es modificado en cada escena.

La prueba realizada repitiendo la determinación del AF a distintas alturas ofrece otra posibilidad de trabajo. En este caso se ordenó por altura la relación entre el número de píxeles clasificados como hoja y las respectivas observaciones de AF, con lo que se obtiene un conjunto ordenado de funciones lineales. La variación que experimentan las pendientes, indica que a menor altura el riesgo de clasificar mal es bajo porque la relación superficie/

pixel es reducida y por el contrario, el incremento de la altura aumenta esta proporción. De igual forma, la ordenada de estas funciones resulta en una contribución constante y cuantitativamente despreciable respecto al término que contiene a la pendiente, en particular cuando la muestra es abundante.

La función cuadrática propuesta para determinar la pendiente de la relación entre el AF y el número de píxeles clasificados como hoja, posee como única incógnita la altura de adquisición de la fotografía y brinda la posibilidad de obtener una estimación con un error promedio cercano a cero y ligeramente menor comparado al método de la superficie de referencia. En este caso adquiere suma importancia la altura a la que se obtienen las imágenes, siendo conveniente disponer de un soporte que asegure la adecuada posición y fijación de la cámara.

Se considera que el criterio más recomendable con respecto a la altura de trabajo, debe consiliarse un menor riesgo de error y capacidad de procesamiento de las tomas cercanas con la situación opuesta para las fotografías adquiridas a mayor altura. En este sentido, una foto tomada entre 1,5 y 2 metros de altura combina razonablemente ambos aspectos.

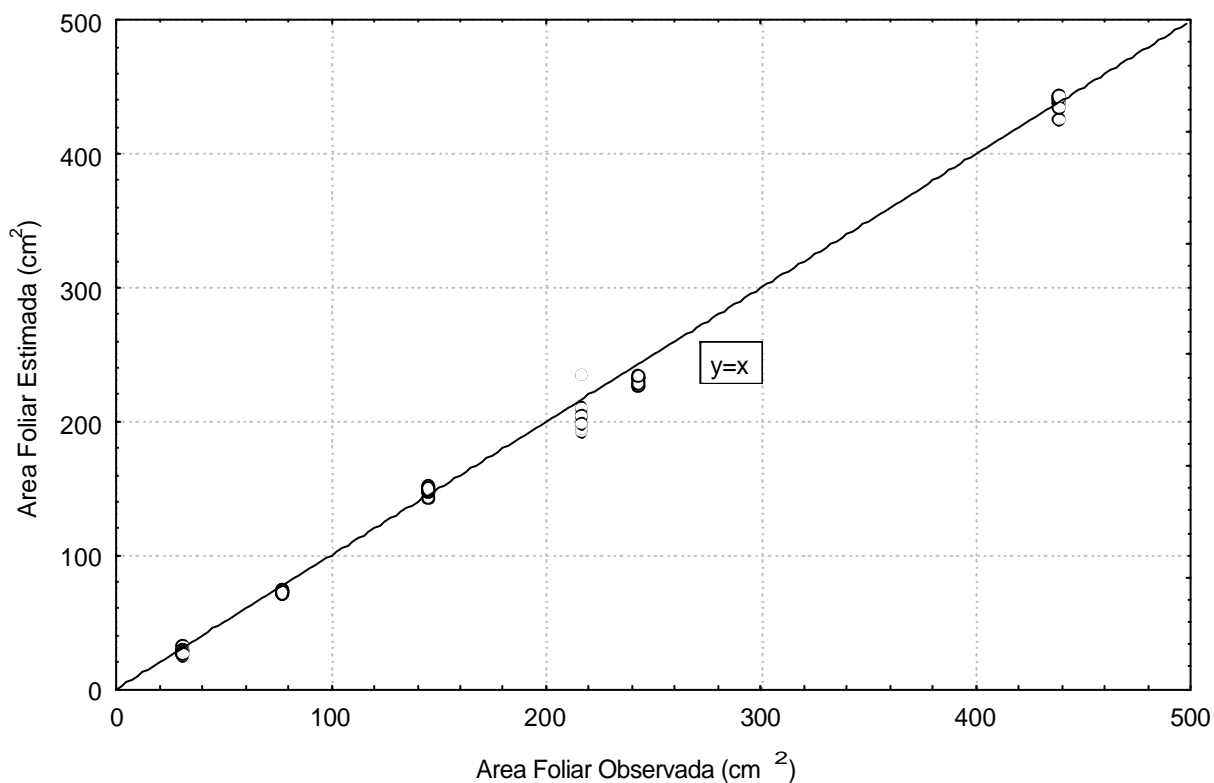


Figura 5. Relación entre el Área Foliar Observada y el Área Foliar Estimada por medio de la variación de la proporción superficie/píxel con la altura

Referencias Bibliograficas

- ASHLEY, D.A., DOSS, B.D., BENNETT, O.L. A method of determining leaf area in cotton. **Agronomy Journal**, Madison, v. 55, p. 584-585, 1963.
- BEVERLY, R.B., VANIERSEL, M.W. Calibration of a video image analysis system for measurement of stem length, leaf area, and percent ground coverage. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, p. 1071-1081, 1998.
- BLACKMER, T.M., SCHEPERS, J.S., VARVEL, G.E et al. Analysis of aerial photography for nitrogen stress within corn fields. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 729-733, 1996.
- EASTMAN, R.J. Clasificación de Remotely Sensed Imagery. In: **IDRISI: User's guide Idrisi for Windows**. Worcester : Clark University. 1997. p. 1-29
- EPSTEIN E., ROBINSON R.R. A rapid method for determining leaf area of potato plants. **Agronomy Journal**, Madison, v. 57, p. 515-516, 1965. p. 393-402, 1994.
- GORDON, R., BROWN D.M., DIXON M.A. Non-destructive estimation of potato leaf area index using a fish-eye radiometer. **Potato Research**, Wageningen, v. 37, p. 393-402, 1994.
- KENNEY, W.A. A method for estimating windbreak porosity using digitized photographic silhouettes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 39, p. 91-94, 1987.
- KORVA J.T., FORBES G.A. A simple and low-cost method for leaf area measurement of detached leaves. **Experimental Agriculture**, Londres, v. 33, p. 65-72, 1997.
- LEE, S.Y. Annual cycle of biomass of a threatened population of the intertidal seagrass *Zostera japonica* in Hong Kong. **Marine Biology**, Berlin, v. 129, p. 183-193, 1997.
- MAAS, S.J. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 655-662, 1988.
- MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production. **Britain. Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, Londres, p. 277-294, 1977.
- OVANDO, G., de la CASA, A., RODRÍGUEZ A. et al. Determinación fotogramétrica del área foliar en papa usando una técnica estándar de interpretación de imágenes de satélites. En XI CONGRESO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA II REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 1999, Florianópolis, SC. **Anais...**, Florianópolis : Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. 2779 p. p. 121-127
- RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resour. Res.**, Richmond, v. 8, p. 1204-1213, 1972.
- SACHS, L. **Estadística Aplicada**. Editorial Labor, Berlin, 1978. 567 p.
- SPITTERS, C.J.T., VAN KEULEN H., VAN KRAALINGEN D.W.G.. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: R. Rabbinge, S.A. Ward, H.H. Van Laar, (Ed.). **Simulation and Systems Management in Crop Protection**. Wageningen : Wageningen, 1989. p. 147-181. (Simulation Monographs 32).
- TSONEV, T, SERGIEV, I. Leaf area measurement using hand scanner. **Photosintética**, Proha, v. 29, p. 625-630, 1993.
- UEHARA, G., TSUJI, G.Y., BALAS, S. **DSSAT Version 3..** Honolulu HI : Department of Agronomy and Soil Science, University of Hawaii, 1994. (Vols. 1-3).
- VAN KEULEN, H., PENNING de VRIES, F.W.T., DREESA, E.M F.W.T. In: F.W.T. Penning de Vries, H.H. Van Laar (Ed.). **Summary model for crop growth: Simulation of Plant Growth and Crop Production**. Simulation Monographs, Wageningen : Pudoc, 1982. p. 87-97.
- WENDT, C.W. Use the relationship between leaf length to estimate the leaf area of Cotton (*Gossypium hirsutum* L), Castors (*Ricinus communis* L.), and Sorghum (*Sorghum vulgare* L.) **Agronomy Journal**, Madison, v. 59, p. 484-486, 1967.
- WENDT, C.W., HAAS, R.H., RUNKLES, J. R. Area measurement of mesquite (*Prosopis glandulosa*) leaves by using leaf length measurements. **Bot. Gaz.**, Chicago, v. 128, p. 22-24, 1967 .