Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Determinación de la geometría del perfil del suelo mediante el diseño de un perfilómetro basado en procesamiento digital de imágenes

Autor: Carlos Yordan González Baffi

Tutor: Dr. Alberto Taboada Crispi

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Determinación de la geometría del perfil del suelo mediante el diseño de un perfilómetro basado en procesamiento digital de imágenes

Autor: Carlos Yordan González Baffi E-mail: cgbuffi@uclv.cu Tutor: Dr. Alberto Taboada Crispi E-mail: ataboada@uclv.edu.cu Consultante: Mr. Maykel Cruz Díaz E-mail: maykelcd@uclv.edu.cu

Santa Clara

2016

"Año 58 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad".

Albert Einstein.

DEDICATORIA

A mi madre.A mi padre.

AGRADECIMIENTOS

- ✤ A mi mamá y a mi hermano, sin ellos hubiera sido imposible.
- A mi tutor por su guía.
- ✤ A Luis por cuidar de mi madre y de mí.
- ✤ A Aimee por motivarme.
- ✤ A Daniel, Magalis y Rafael por su ayuda incondicional.
- ✤ A mi familia por estar siempre cuando los necesito.
- A los amigos de estos cinco años que los hicieron memorables, Yordan, Christian, Jennifer, Arnaldo y muchos otros.

TAREA TÉCNICA

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos planteados para la realización del trabajo se tomaron en cuenta las siguientes tareas técnicas:

- 1. El estudio bibliográfico sobre la necesidad de la determinación del perfil geométrico del suelo y de los parámetros de interés que se pueden determinar a partir de este.
- 2. La caracterización de los métodos más utilizados para la determinación de la geometría del perfil del suelo.
- 3. La realización de un estudio sobre los métodos de procesamiento digital de imágenes óptimos para el desarrollo del software.
- 4. El estudio de las condiciones del terreno para el diseño de la herramienta necesitada de acuerdo al software.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

La determinación de la geometría del perfil de suelos arados es necesaria para el diseño de órganos de trabajo, el estudio de suelos y el análisis de la remoción que provocan ciertos implementos de labranza. Debido a las dificultades que presentan los perfilómetros usados hasta ahora, en este trabajo se diseña un nuevo perfilómetro que supera limitaciones de los anteriores. El perfilómetro diseñado basa su funcionamiento en el procesamiento digital de imágenes, el mismo consta con una herramienta de medición y un software para el trabajo en el laboratorio. Dentro de los métodos de procesamiento diseñados destacan el recorte automático de la imagen a partir del reconocimiento de la figura de calibración y la alineación de la imagen para corregir la distorsión por la perspectiva con que es tomada la fotografía. Para el diseño del método de alineación fue necesario realizar una revisión bibliográfica actualizada sobre el alineamiento en imágenes. Se demuestra mediante experimentos realizados que el perfilómetro diseñado representa con gran veracidad la información deseada y que la variación de los resultados producto a las diferentes perspectivas con que se toma la fotografía no es significante.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTOi
DEDICATORIA ii
AGRADECIMIENTOS iii
TAREA TÉCNICAiv
RESUMENv
INTRODUCCIÓN1
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA4
1.1 Importancia de la determinación de la geometría del perfil topográfico del suelo4
1.2 Técnicas más utilizadas para determinar la geometría del perfil topográfico del suelo. 7
1.2.1 Métodos Directos
1.2.2 Métodos Indirectos10
1.3 Alineación de imagen14
Conclusiones del Capítulo16
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS17
2.1 Funcionamiento general del perfilómetro diseñado17
2.2 Herramienta de medición
2.2.1 Herramienta diseñada
2.3 Métodos de procesamiento

2.3.1	Recorte automático de la imágen	24
2.3.2	Alineación automática de la imagen	25
2.3.3	Obtención automática de la geometría del perfil del suelo	
2.3.4	Cálculo automático de los parámetros de la geometría del perfil del	suelo27
2.4 E	valuación de los algoritmos	
2.4.1	Experimento 1	
2.4.2	Experimento 2	
2.4.3	Experimento 3	
2.5 In	nterfaz Gráfica	
Conclus	iones del Capítulo	
CAPÍTUL	O 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 N	létodo de Recorte Automático	
3.2 N	létodo de Alineación Automática	
3.2.1	Experimento 1	
3.2.2	Experimento 2	
3.3 C	comparación con el método de Cruz Díaz et al (Cruz Díaz, Herrera Suár	ez et al.
2015). E	Experimento 3	44
3.4 C	conclusiones del capitulo	
CONCLU	SIONES Y RECOMENDACIONES	49
Conclus	iones	49
Recome	ndaciones	49
REFEREN	ICIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS		
Anexo I	Proceso de obtención de la geometría del perfil del suelo a partir de	la
fotograf	ía tomada	55

Anexo II	Resultados individuales de las cinco fotos del Experimento 2	57
Anexo III	Interfaz Gráfica	59

INTRODUCCIÓN

El perfil del suelo se define como la desviación típica de las elevaciones superficiales del suelo, considerando los cambios debidos a la pendiente del terreno, y las huellas que puedan dejar los neumáticos de las máquinas y ciertos implementos de laboreo [1].

La determinación de la geometría del perfil del suelo en campos plantados en surcos y listos para demoler, posibilita calcular los parámetros geométrico-dimensionales de los órganos de trabajo de un nuevo apero y diseñar los mismos, con el apoyo de softwares especializados para el cálculo ingenieril [2].

Determinar la geometría del perfil del suelo una vez terminada la labranza adquiere gran importancia ya que es uno de los parámetros que da la posibilidad de determinar la forma que toma el suelo, luego que sobre el actúa la fuerza de los neumáticos u órganos de trabajo de las diferentes máquinas agrícolas durante el laboreo [2].

De esta forma, la medición de la geometría del suelo es trascendental para entender los procesos a los que se ven sometidos los mismos. Los mayores retos para llevar a cabo dicha medición residen en las dificultades para evitar la interacción con el terreno, la sensibilidad de los instrumentos de medida en las condiciones de campo y las escalas milimétricas que son necesarias. En este tipo de medición es importante que la tecnología empleada sea fiable y que represente con la mayor veracidad posible la geometría del perfil del suelo [3].

Las técnicas más utilizadas para medir la topografía superficial del suelo, eran técnicas de contacto, tediosas y que alteraban el muestreo. Los costes de estas tecnologías se incrementan considerablemente a medida que las tecnologías emergentes aportan resultados que se obtienen más rápidamente y de forma más cómoda [4].

1

Los métodos más utilizados para determinar la geometría del perfil del suelo son el perfilómetro de varillas y el perfilómetro de láser.

Estos métodos hasta ahora no presentan problemas en laboratorio, pero presentan graves inconvenientes cuando se trabaja en el campo, en condiciones reales, dificultando el objetivo para el que realmente se han creado. La dificultad del desarrollo de estos métodos se incrementa porque tanto los métodos con y sin contacto presentan ciertos inconvenientes para medir los parámetros en campo, ya sea porque alteran las condiciones reales o por la sensibilidad de los aparatos necesarios para las mediciones [4].

Un nuevo método para determinar la geometría del perfil del suelo es basado en el procesamiento digital de imágenes [3]. Este método no presenta los inconvenientes de los métodos anteriores ya que no modifica el área donde se realiza la medición ni es afectado por la iluminación grande que existe en estos terrenos. Además es de sencilla manipulación en el campo de trabajo. Sin embargo en este método no se incluye una alineación de la imagen. Si la imagen presenta gran distorsión por la altura y ángulo con que es tomada, entonces el perfil de la geometría del suelo obtenido se aleja del correcto. Además se hace complicado el trabajo en el laboratorio pues es necesario trabajar con dos softwares, para recortar la imagen y para obtener el perfil, y para la obtención del perfil es necesario personal que tenga conocimiento del procesamiento de imágenes en el software especializado Matlab.

A partir de lo planteado podemos entonces formular el problema científico:

¿Cómo obtener la geometría del perfil del suelo mediante el procesamiento digital de imágenes independientemente de la distancia, altura y ángulo?

El **objetivo general** del trabajo es diseñar una herramienta y software capaz de obtener la geometría del perfil del suelo mediante procesamiento digital de imágenes de manera automática e independiente de la distancia, altura y ángulo.

Los objetivos específicos son:

- 1. Diseñar un método para el recorte automático de la imagen.
- 2. Diseñar un método para la alineación automática de la imagen.
- Diseñar un método para la obtención automática de la geometría del perfil del suelo en la imagen.
- 4. Diseñar una herramienta de medición.
- Diseñar un método para calcular los parámetros de interés de la geometría del perfil del suelo.
- 6. Crear una interfaz gráfica para facilitar el uso del software.
- Comparar el método de procesamiento digital de imágenes diseñado, con el método de Cruz Díaz et al [3].

CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se explica la importancia de las mediciones del perfil del suelo, se expone los principales métodos para la determinación de la geometría del perfil del suelo y los estudios más novedosos sobre alineamiento de imágenes.

1.1 Importancia de la determinación de la geometría del perfil topográfico del suelo.

El perfil del suelo se define como la desviación típica de las elevaciones superficiales del suelo, considerando los cambios debidos a la pendiente del terreno, y las huellas que puedan dejar los neumáticos de las máquinas y ciertos implementos de laboreo [1].

La determinación de la geometría del perfil del suelo en campos plantados en surcos y listos para demoler, posibilita calcular los parámetros geométrico-dimensionales de los órganos de trabajo de un nuevo apero y diseñar los mismos, con el apoyo de softwares especializados para el cálculo ingenieril [2].

Específicamente es necesario la geometría del perfil del suelo, listo para demoler, para el cálculo de la demanda tractiva y de potencia del nuevo apero. El cálculo de la demanda traccional de los órganos del nuevo apero según la formula racional de Goriachin, se define como:

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

El término P1, representa la resistencia que ejercen el peso del apero y la fricción de sus órganos de apoyo. El mismo se determina, como:

$$P_1 = f.G$$

Donde:

f- coeficiente de fricción;

G- peso del apero;

El coeficiente f toma como valor promedio 0,5.

El término P2 expresa la resistencia a la tracción del apero debido a las características del suelo y magnitud del área cortada. El mismo se determina, como:

$$P_2 = K.a.b$$

Donde:

- b Ancho de la capa vegetal, m;
- a Altura de la capa vegetal, m;

K – Coeficiente de resistencia específica del suelo, kg/m².

La resistencia a la tracción del arado depende además, de su velocidad de movimiento (V), ya que la capa o prisma de suelo que es cortado al desplazarse por la superficie de la reja o vertedera es lanzado con cierta fuerza. Esta resistencia que surge de este desplazamiento (P3) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$P_3 = \varepsilon. a. b. v^2$$

Donde:

 ε – Coeficiente que depende de la fórmula de la superficie de trabajo del arado y de las profundidades del suelo. Por datos experimentales este coeficiente se toma entre los límites $\varepsilon = 200 \text{ a } 500 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$ [5].

Los procesos y los cambios en la geometría del suelo, son los principales factores para determinar la influencia de la remoción y transporte del suelo, así como su degradación [6].

La geometría del suelo, actúa en una escala menor como un factor de erosionabilidad, determinando la resistencia o vulnerabilidad a la erosión por parte de un suelo determinado [7].

La geometría del perfil del suelo, puede llegar a cambiar rápidamente, debido a procesos erosivos. De esta forma, en los suelos agrícolas esta superficie se altera debido a las operaciones de laboreo, el tránsito del ganado y las máquinas agrícolas, la compactación y la erosión y deposición de la lluvia y el viento. Los ciclos de humedad y sequía y de congelación y descongelación representan factores que pueden también alterar dicha propiedad [8].

Para comprender el sentido mecánico de los procesos que tienen lugar en el suelo bajo la acción de los órganos de trabajo de las máquinas e implementos de labranza, es necesario estudiar primeramente sus propiedades dinámicas. Las mismas son expresadas a través de su movimiento, como el resultado de la aplicación de las fuerzas externas. El objetivo de la labranza puede ser alcanzado solamente por la aplicación de fuerzas sobre el suelo por los implementos de labranza. Por lo que determinar la geometría del perfil del suelo una vez terminada la labranza adquiere gran importancia ya que es uno de los parámetros que da la posibilidad de determinar la forma que toma el suelo, luego que sobre el actúa la fuerza de los neumáticos u órganos de trabajo de las diferentes máquinas agrícolas durante el laboreo [2].

La obtención de la geometría del perfil topográfico del suelo permite analizar la remoción del suelo que provoca distintos implementos de labranza, determinando el área de suelo disturbada (Ad), el ancho de trabajo (At), la profundidad de trabajo (Pt), considerados de acuerdo con la **Figura 1.1** [9].



Figura 1.1: Área típica de suelo disturbado con arado de cincel.

$$Ad = area disturbada; At = ancho de trabajo; Pt = profundidad de trabajo.$$

De esta forma, la medición de la geometría del suelo es trascendental para entender los procesos a los que se ven sometidos los mismos. Los mayores retos para llevar a cabo dicha medición residen en las dificultades para evitar la interacción con el terreno, la sensibilidad de los instrumentos de medida en las condiciones de campo y las escalas milimétricas que son necesarias. En este tipo de medición es importante que la tecnología empleada sea fiable y que represente con la mayor veracidad posible la geometría del perfil del suelo [3].

1.2 Técnicas más utilizadas para determinar la geometría del perfil topográfico del suelo.

Para determinar la rugosidad de un suelo es necesario contar con una medida precisa de la altura del suelo en numerosos puntos de su superficie. Con ese objetivo se han desarrollado varios métodos, los cuales difieren en precisión y naturaleza. Se distinguen entre métodos de contacto y métodos indirectos. Los primeros son más fáciles de aplicar pero menos precisos, pues interactúan directamente con el medio donde se realiza la medición deformándolo y los segundos son más laboriosos, pero en general, más precisos ya que no interactúan directamente con el medio donde se realiza la medición [10].

La falta de progreso en la cuantificación del microrrelieve superficial era atribuida a técnicas laboriosas de campo que producían topografía digitalizada a bajas resoluciones, limitando la calidad de los datos [11].

Efectivamente, las técnicas más utilizadas para medir la topografía superficial del suelo, eran técnicas de contacto, tediosas y que alteraban el muestreo, principalmente la técnica de varillas, en el que una varilla o una red de varillas son utilizadas sobre la superficie, y su posición, así como los cambios son registrados, de forma electrónica o fotográfica y digitalizada más tarde [4].

Los costes de estas tecnologías se incrementan considerablemente a medida que las tecnologías emergentes aportan resultados que se obtienen más rápidamente y de forma más cómoda [4].

La mayoría de los métodos no presentan problemas en laboratorio, pero presentan graves inconvenientes cuando se trabaja en el campo, en condiciones reales, dificultando el objetivo para el que realmente se han creado. La dificultad del desarrollo de estos métodos se incrementa porque tanto los métodos con y sin contacto presentan ciertos inconvenientes para medir los parámetros en campo, ya sea porque alteran las condiciones reales o por la sensibilidad de los aparatos necesarios para las mediciones [4].

1.2.1 Métodos Directos

Perfilómetro de varillas

La metodología basada en la realización de perfiles con varillas ha sido la primera que se desarrolló para la toma de datos sobre el relieve y microrrelieve superficial del suelo y, por tanto, la más utilizada a lo largo de las investigaciones que se han llevado a cabo y la más ampliamente validada en campo [4, 10, 12, 13].

La metodología se basa en una varilla, o una serie de varillas móviles, que pueden desplazarse verticalmente, que se adaptan a una estructura, y que se elevan de acuerdo a las diferentes alturas del suelo, al apoyarlas en la superficie a medir. Moviendo la estructura a intervalos regulares puede recolectarse una superficie en distancias de ambos ejes conocidas.

La toma de datos de las diferentes alturas se lleva a cabo con el contraste que se obtiene con un fondo calibrado o una referencia dentro de la propia estructura. Entre las aplicaciones de calibración que se pueden hallar en la literatura están la utilización de una superficie de fondo milimetrada [12] o de imágenes digitalizadas [4, 8, 14].

Los aparatos más utilizados se basan en el desarrollado por Wagner et al [14] (**Figura 1.2**), en el que una hilera de varillas de peso ligero se disponen en un instrumento de forma que pueden desplazarse. De esta forma, cuando el aparato se deja en la superficie del terreno, las varillas se desplazan de acuerdo a la geometría superficial del suelo.



Figura 1.2: Perfilómetro de varillas desarrollado por Wagner et al [14].

Las diferentes alturas se obtienen a través de las imágenes recogidas por una cámara que por triangulación recoge las diferencias de altura. La calibración se realiza de acuerdo a las distancias a las marcas de referencia del marco de la estructura.

Esta metodología representa la forma más sencilla y probada de registrar la rugosidad superficial o perfil del suelo, igualmente, no presenta el inconveniente asociado al transporte y daños de las tecnologías más avanzadas utilizadas en otros métodos de más reciente desarrollo.

Sin embargo, esta interfiere con la superficie de medición porque las varillas, y parte de la estructura, entran en contacto con la superficie del suelo durante las mediciones, alterando la superficie que se ha registrado. De esta forma, la repetición de las mediciones no puede llevarse a cabo, ya que es imposible dejar la superficie medida con la misma rugosidad inicial, debido al peso del instrumento y a la manipulación por parte del operador [4, 8, 10].

Método de la cadena

Una nueva técnica para medir la rugosidad superficial del suelo es el método de la cadena [15]. Dicha metodología se basa en la utilización de una cadena que puede rodar por la superficie del suelo, y cuya disposición determina las elevaciones superficiales. Para calcular la elevación se resta la longitud de la cadena en su disposición en el suelo de la longitud total de la cadena en una superficie plana. Dicha diferencia da lugar a un coeficiente denominado "rugosidad de cadena" y que sirve para determinar la rugosidad de diferentes superficies [4, 8, 10].

Este método no determina la geometría del perfil del terreno solo un coeficiente de rugosidad de este.

1.2.2 Métodos Indirectos

Rugosímetro láser

Con el desarrollo de los transductores ópticos sin contacto a finales de los años ochenta la adquisición de datos de geometría del perfil se convirtió en una realidad. En general, dichos transductores eléctricos utilizan una fuente de luz, la más utilizada es un rayo de luz láser de bajo poder de Helio-Neon, para proyectar un punto de luz sobre la superficie y un sistema sensible de imágenes opto-electrónico para detectar la posición del haz de luz reflejado. Dichos transductores presentaban el problema de utilizar un perfilador de superficie que trabajaba en una dimensión. Las variaciones entre los diferentes aparatos se basaban en la fuente de luz, la geometría óptica, el detector y el circuito que procesaba la señal o algoritmo [8, 16-18].

A partir de la idea bidimensional de los datos de medida de rugosidad, se desarrolló un sistema digital capaz de producir múltiples perfiles de superficie en espacios muy próximos para cuantificar la geometría del perfil [19]. Este sistema contaba con un escáner portátil capaz de digitalizar la geometría del perfil del suelo, en dos dimensiones (2-D), en una rejilla de 0,5 mm de separación de puntos con una resolución de elevación de 0,1 a 0,3 mm. La estructura utilizaba para moverse una corredera lineal y una transmisión por cable o eslabones. Con este mecanismo, (**Figura 1.3**), el instrumento era capaz de digitalizar un trayecto de un metro de longitud en 6 segundos con datos de elevación tomados cada 0,5 mm de separación de los puntos a medir [4, 8].



Figura 1.3: Escáner láser con la unidad de escaneo montada en la estructura [20].

El primer prototipo desarrollado presentaba los inconvenientes de su estructura y tamaño inadecuado para los trabajos de campo, así como graves problemas relacionados con el efecto sombra, que impedían la representación real de la imagen a digitalizar. A partir de las diversas experiencias obtenidas con los aparatos iniciales, se empezó a experimentar con un nuevo modelo, esquematizado en la (Figura 1.4), en el que el emisor y el receptor están dispuestos sobre una estructura en línea, más flexible, que permite medir instantáneamente las alturas de un perfil de superficie de forma más rápida, gracias al avance de las diferentes tecnologías informáticas y ópticas [21]. Puesto que las medidas se realizan a lo largo de un raíl, el diseño y el transporte están simplificados. De esta forma, el primer diseño, o láser de escaneo puntual, como su nombre indica, basa su sistema en escaneo de puntos, mientras que el nuevo prototipo láser escanea los perfiles de la superficie, por esta razón se le ha bautizado como método láser de escaneo instantáneo de perfil. El principio de actuación del modelo, es el mismo que el anterior, con la única diferencia de que la estructura es más flexible y que posee dos diodos láser que generan una línea estrecha en la superficie del suelo, que se encuentra en el campo de visión de la cámara, de esta forma en lugar de medir punto por punto, genera perfil por perfil. El procedimiento de calibración convierte las coordenadas detectadas por el montaje de la cámara en coordenadas espaciales y reproduce automáticamente las variaciones de altura. El mapeo de las alturas de la superficie se realiza grabando los sucesivos perfiles a medida



que el ensamblaje, formado por la cámara y los puntos de luz de ambos láseres, se mueve automáticamente a través del raíl. A continuación se muestra el esquema del nuevo diseño.

Figura 1.4: Rugosímetro láser para perfiles instantáneos [21].

Estos rugosímetros en dos dimensiones determinan la rugosidad del suelo en un área determinada, pero por su principio de funcionamiento también nos brinda la geometría del perfil del suelo, que es nuestro interés en este trabajo y para este propósito un rugosímetro en una dimensión es suficiente.

El rugosímetro láser presenta limitantes cuando se trabaja en condiciones de alta iluminación donde la luz láser se atenúa y no es captada por la cámara. También en superficies brillantes, debido a que la alta reflectividad de las mismas satura la cámara produciendo un engrosamiento de la línea láser en la imagen con su posterior pérdida de resolución [4, 22].

Fotogramétricos

Cada vez más se trabaja en métodos de simplificación de toma de datos, de esta forma uno de los métodos más prometedores es el de análisis de imágenes de relieves digitales. En estudios realizados se demostró estudios la validez de la fotografía analítica para cuantificar los cambios de la geometría del perfil del suelo en parcelas iguales o menores de 1 m² [23].

Una de las ventajas de la técnica fotogramétrica, en comparación con la técnica de varillas es que las fotografías de la superficie suministran un registro continuo del estado de la rugosidad superficial del suelo en un momento determinado, que puede ser re-evaluado posteriormente [4].

Se utilizó la fotogrametría terrestre para modelar las direcciones de flujo superficial que se hallaban en campos de maíz [24]. Los datos de medida se tomaron en la forma de coordenadas x, y, z y se utilizaron para generar modelos digitalizados del terreno a partir de los cuales eran capaces de predecir el flujo superficial. Estos datos no se utilizaron para definir los cambios en la rugosidad superficial o microformas [4].

Las técnicas de análisis de imágenes permiten almacenar el estado de la geometría superficial del suelo y su evolución a través del análisis de las imágenes de una localización específica [4].

Los equipos de fotografía modernos, con mayor resolución, y los equipos informáticos, con mayor capacidad de interpretación y almacenamiento de imágenes, permiten en la actualidad llevar a cabo la interpretación de las elevaciones de la superficie del suelo. La orientación espacial es posible con estos equipos en el plano x/y, así como el cálculo de la elevación, a través de la interpretación y calibración de la imagen.

Una de las ventajas que presenta este método es la posibilidad de estudiar las características de la superficie que no son morfológicas, distinguiendo las variaciones a pequeña y gran escala de los datos en las coordenadas cartesianas x, y, z. Por esta razón, una de las mayores aplicaciones de la fotografía analítica en el estudio del suelo ha sido el estudio y la identificación de las propiedades geológicas, así como su evolución morfológica en el tiempo. Asimismo, la geometría del perfil superficial puede también ser digitalizado fotogramétricamente analizando un estéreo par de la imagen de la superficie [4, 25]. Estas técnicas producen elevaciones digitalizadas en puntos en rejilla en un rango de separación desde 5 a 50 mm. Su principal utilidad es cuantificar características de la superficie a grandes escalas como pueden ser las marcas de labranza y maquinarias o la rugosidad direccional y geometría del desarrollo de la superficie del suelo en varios estudios, [20, 26] aunque en ellos se ha ignorado la posibilidad de combinar la información de la rugosidad del terreno con atributos no morfológicos de dicha superficie los cuales también se pueden obtener a partir de las mismas fotografías [4].

Nuevos Métodos

Una de las últimas metodologías desarrolladas, que parece prometedora, de toma de datos de la rugosidad superficial del suelo, y que se ha diseñado tomando como modelo la basada en la técnica láser sin contacto [11, 19] es la basada en técnica ultrasónica [27], llegando a resultados similares, cuando se utiliza un adecuado número de muestras y la superficie de medición es porosa. La técnica aún presenta muchas limitaciones para obtener datos completos de muestreo y depende en gran medida de la superficie a estudiar, pero se sigue experimentado y perfeccionando.

Un nuevo método para determinar la geometría del perfil del suelo es basado en el procesamiento digital de imágenes [3]. En este método Cruz Díaz utiliza una pizarra de cartón blanca como fondo del perfil del surco para tomar la imagen, luego recorta la imagen con el software especializado hyperSnap6 y después realiza el procesamiento adecuado con el software especializado Matlab R2012b. Al comparar los resultados de este método con el método tradicional del perfilómetro de varillas se demostró que el método de tratamiento de imágenes es confiable para determinar la geometría del perfil del suelo, aunque en este método no se incluye una alineación de la imagen, es decir que se mantiene la distorsión provocada por la distancia, ángulo y altura de colocación con que fue tomada la foto.

El nuevo método no presenta los inconvenientes de los métodos anteriores ya que no modifica el área donde se realiza la medición ni es afectado por la iluminación grande que existe en estos terrenos. Además es de sencilla manipulación en el campo de trabajo. Sin embargo si la imagen presenta gran distorsión por la altura y ángulo con que es tomada, entonces el perfil de la geometría del suelo obtenido se aleja del correcto. Además se hace complicado el trabajo en el laboratorio pues es necesario trabajar con dos softwares, para recortar la imagen y para obtener el perfil, y para la obtención del perfil es necesario personal que tenga conocimiento del tratamiento de imágenes en el software especializado Matlab.

1.3 Alineación de imagen

El alineamiento de imágenes consiste en el movimiento, y posiblemente deformación, de la imagen para minimizar la diferencia entre la referencia y la imagen. Desde el primer uso del alineamiento de imágenes en el algoritmo del flujo óptico [28], el alineamiento de imágenes se ha convertido en una de las técnicas más usadas en visión computacional [29].

Algunas de las aplicaciones del algoritmo del flujo óptico incluyen rastreo [30-34], estimación de movimiento [35-37], construcción de mosaico [38], registro de imágenes médicas [39-42], reconocimiento de rostro [43-45], estimación de profundidad [41], estimación de topografía [46], entre otras.

El acercamiento usual para la alineación de imágenes es el descenso de gradiente. Una variedad de otros algoritmos numéricos tal como descomposición diferencial [47] y regresión linear [43] también han sido propuestos, pero el descenso de gradiente es el estándar por defecto. Sin embargo el descenso de gradiente puede ser realizado en una variedad de maneras diferentes. Una diferencia entre los varios acercamientos es si ellos estiman un incremento aditivo de los parámetros (el acercamiento aditivo [28]), o si ellas estiman una deformación incremental que está entonces compuesto con la estimada común de la deformación (el acercamiento composicional [38]). Otra diferencia es si el algoritmo realiza un Gauss-Newton, un Newton, un *steepest-descent*, o una aproximación Levenberg-Marquardt en cada paso de descenso de gradiente [29]. Un eficiente algoritmo es el de composición inversa [48].

En [49] se propone el uso del coeficiente de correlación como un criterio de rendimiento para el problema de alineación de la imagen, en este trabajo se desarrollan dos esquemas iterativos, uno basado en el acercamiento aditivo hacia adelante y el segundo en el método de composición inversa.

Conclusiones del Capítulo.

Los perfilómetros más usados hasta hoy son tediosos en el trabajo de campo o presentan limitaciones ante las condiciones típicas de los terrenos de estudio. El nuevo método basado en PDI no presenta las dificultades de los perfilómetros anteriores pero cuando la deformación por perspectiva aumenta el perfil calculado se aleja del correcto, por lo que es necesario el desarrollo de un método de alineación de la imagen para que la determinación de la geometría del perfil del suelo mediante PDI sea confiable. Un eficiente método de alineación de imágenes es el algoritmo de composición inversa. Como criterio de rendimiento para la alineación de la imagen puede usarse el coeficiente de correlación.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Funcionamiento general del perfilómetro diseñado

El perfilómetro diseñado calcula la geometría del perfil del suelo y sus parámetros de interés a partir de una foto del perfil sobre una herramienta, basando su principio de funcionamiento en el procesamiento digital de imágenes (PDI).

En la **Figura 2.1** se muestra un diagrama en bloques general del funcionamiento del perfilómetro basado en PDI.



Figura 2.1: Diagrama en Bloques General del Perfilómetro basado en PDI.

En el diagrama en bloques de la **Figura 2.1** se resume el funcionamiento del perfilómetro diseñado, en tres bloques. En el bloque 1 se coloca la herramienta de medición en el terreno de estudio. Para la correcta medición se fija la herramienta a nivel con la horizontal y nos aseguramos que el perfil interesado quede delante del fondo blanco. En el bloque 2 se toma la fotografía a la herramienta correctamente colocada. Antes de tomar la imagen debemos asegurarnos que no sobresalga en el fondo blanco algún material no deseado como pudiera ser hierba seca y que no incida la sombra de algún objeto sobre el fondo blanco. La foto puede tomarse con cualquier cámara o celular y con cualquier resolución. La resolución influirá en la cantidad de muestras tomadas. El tercer bloque es donde se realiza el procesamiento de la imagen para obtener la geometría del perfil y sus parámetros de interés.

En la Figura 2.2 se muestra una foto de la herramienta de medición correctamente colocada.



Figura 2.2: Foto de la Herramienta de Medición correctamente colocada.

En la **Figura 2.2** se observa la herramienta de medición correctamente colocada y como se limpió correctamente el terreno para que no interviniera ningún material no deseado en el perfil del suelo. Además se observa como no hay sombra de ningún objeto sobre la herramienta.

2.2 Herramienta de medición

La herramienta de medición debe tener una zona de calibración para eliminar la distorsión provocada por la perspectiva con que es tomada la foto. Esta zona debe ser con dos colores que tengan entre ellos un alto contraste para su fácil procesamiento. También debe tener una zona de información que es la que se usa como fondo del perfil del suelo interesado. Esta zona debe ser preferiblemente blanco para que contraste con el suelo y facilite el procesamiento. Debe tener algún material por debajo de este que ayude a fijarse al suelo y así poder colocarlo a nivel con la horizontal. Puede tener un nivel incluido o si no utilizar

uno independiente en el momento de tomar la medición. Puede tener un agarre para facilitar su transportación.

2.2.1 Herramienta diseñada.

La herramienta diseñada presenta forma de rectángulo con un largo de 2.10 metros y un alto de 0.70 metros. De los 0.70 m de alto los 5 centímetros superiores se destinaron para fijar el agarre de la herramienta y para fijar un nivel. Los 25 cm por debajo de esta zona es el área de calibración de la imagen, es la zona que da la información de la distorsión de la imagen tomada, debido a la altura, ángulo y distancia con que es tomada. Los últimos 40 cm de la herramienta es el área de información, es la zona de fondo al perfil del suelo interesado. En la **Figura 2.3** se muestra una foto de la herramienta diseñada.



Figura 2.3: Herramienta de Medición diseñada.

Para la colocación del instrumento diseñado por debajo de este se fijaron varillas para sujetarlo al suelo. Estas varillas se pueden retirar del instrumento con el fin de facilitar su transportación Para la fácil manipulación se fijó un agarre en la zona superior del instrumento. En la **Figura 2.4** se muestra una de las 7 varillas que se colocan a la herramienta, fijada a esta.



Figura 2.4: Varilla fijada a la Herramienta de Medición.

El área de calibración contiene una estructura ajedrezada, con un borde negro de un centímetro de grosor, de dos metros de largo y veinte centímetros de alto. La estructura ajedrezada tiene 22 cuadrados de largo y 2 cuadrados de alto, los lados de los cuadrados son de nueve centímetros. Esta figura ajedrezada es el patrón de calibración que se utiliza para la alineación de la imagen.

El área de información es de color blanco para que contraste con el suelo y así facilite la obtención del perfil de este.

Patrón de calibración digital.

El patrón de calibración se diseñó con el software profesional Corel Draw versión x6, este es un software de diseño gráfico que utiliza gráficos vectoriales. Luego de su diseño digital se imprimió en papel para acrílico que es utilizado para carteles. El patrón de calibración digital es el que se utiliza como referencia para la alineación de la imagen.

Materiales utilizados.

Los materiales utilizados son un cartón de 2.10 metros por 0.70 metros con seis tablones por detrás para su soporte, cuatro de 0.50 metros y dos de 2.10 metros. El material para el fondo blanco y la figura de calibración es un papel acrílico especial que es utilizado para carteles, el cual no pierde color cuando se moja y para limpiarle la tierra o el fango del terreno con un paño húmedo se logra fácilmente. Se confeccionó con la misma madera de los tablones de soporte el agarre de la herramienta. Se utilizó siete alambrones, de 20 centímetros cada uno, para el soporte al suelo.

2.3 Métodos de procesamiento

Los métodos de procesamiento fueron programados en el software matemático MATLAB, versión 2015^a. En la **Figura 2.5** se muestra un diagrama en bloques general del procesamiento automático diseñado.



Figura 2.5: Diagrama en Bloques General del Procesamiento Automático realizado a la imagen.

El procesamiento automático diseñado se resume en la **Figura 2.5**. Como se muestra fueron cuatro los métodos diseñados para el procesamiento de la imagen; el recorte automático de la imagen, la alineación automática de la imagen, la obtención automática de la geometría del perfil del suelo en la imagen y el cálculo automático de los parámetros de interés en la geometría del perfil del suelo. A la imagen se le realiza primero el recorte automático de la zona de calibración y de la zona de información. Luego se realiza la alineación automática

de la zona de información, para esto se halla la transformada de corrección a partir de la imagen recortada de la zona de calibración y de la imagen del patrón de calibración digital, el cuál no presenta ninguna distorsión. Con la imagen de la zona de información alineada se halla la geometría del perfil del suelo. Por último con la geometría del perfil del suelo se calculan los parámetros de interés.

2.3.1 Recorte automático de la imágen.

La imagen se recorta en dos imágenes, una contiene el área de calibración para su posterior uso en la alineación de la imagen y la otra contiene el área de información para su posterior alineación.

Para lograr el recorte automático se creó una función que reconoce automáticamente el patrón de calibración. Esta función realiza un procesamiento a la imagen para conocer las coordenadas por donde realizar el recorte, luego realiza el recorte, según las coordenadas halladas, a la imagen original.

Para hallar las coordenadas del recorte, la imagen original es filtrada con un filtro de mediana de 7x7, para reducir ruidos y bordes, luego es sometida a un proceso de binarización utilizando el modelo de Otsu, [50] y después es rellenada, proceso que rellena todos los pixeles conectados menores que un umbral preestablecido. La imagen resultante de este proceso (**Figura 2.6**) es analizada para detectar el patrón de calibración, para esto el procesamiento se basa en detectar los cambios de blanco para negro que hay en la imagen binarizada, la cantidad de cambios que deben haber y a la distancia aproximada que deben estar estos cambios.



Figura 2.6: Ejemplo de imagen, binarizada y rellenada, para detectar el patrón de calibración.

Una vez detectado el patrón de calibración son definidas las coordenadas del recorte y luego se realiza el recorte a la imagen original obteniendo dos imágenes, la imagen de la zona de información y la imagen de la zona de calibración.

2.3.2 Alineación automática de la imagen.

Para la alineación de la imagen se usa el criterio de rendimiento del coeficiente de correlación y el esquema iterativo basado en el método de composición inversa, [49].

Se usa el patrón de calibración digital sin distorsión como la imagen de referencia, y con la imagen recortada que contiene el patrón de calibración distorsionado se calcula la transformada necesaria para eliminar la distorsión. Luego se aplica la transformada hallada a la imagen recortada que contiene la zona de información.

Para hallar la transformada necesaria se basa en el criterio del coeficiente de correlación. Se realiza una optimización iterativa, donde en cada iteración la función objetivo no lineal es

aproximada por una transformada. Usando como índice el coeficiente de correlación común entre la imagen de referencia y la imagen distorsionada, vamos actualizando la transformada hasta que el coeficiente de correlación común es mayor que 0.9.

La transformación realizada es homográfica y la transformada se fijó en una matriz de 3x3 para menor complejidad computacional.

Se utiliza una estructura piramidal para disminuir el costo computacional. Ambas imágenes (la de referencia y la distorsionada) son redimensionadas a la mitad de sus dimensiones sucesivamente para obtener los distintos niveles, una vez que la cantidad de elementos de la imagen de referencia es inferior a 400 se alcanza la mayor cantidad de niveles posibles. La imagen de nivel 1 sería la de mayor dimensión y la de mayor nivel la de menor dimensión. Se comienza la transformación por la imagen de mayor nivel a la que se le aplica la cantidad de iteraciones definidas (30 en nuestro caso) y si el coeficiente de correlación común no es mayor que 0.9 se prosigue con la imagen de nivel inferior con la transformada actualizada por las iteraciones hechas anteriormente. Esto permite ir realizando desde una aproximación gruesa hasta una aproximación fina lo que mejora notablemente el costo computacional.

Cuando el coeficiente de correlación común entre la imagen de referencia y la imagen distorsionada es mayor que 0.9 tomamos la transformada obtenida y es aplicada a la imagen recortada que contiene la zona de información obteniendo la imagen de la zona de información correctamente alineada.

2.3.3 Obtención automática de la geometría del perfil del suelo.

Para obtener la geometría del perfil del suelo con las medidas reales se utiliza la imagen de la zona de información correctamente alineada. Se filtra la imagen con un filtro de mediana de 7x7 para reducir ruidos y bordes. Luego es sometida a un proceso de binarización utilizando el modelo de Otsu [50]. Una vez binarizada la imagen, es rellenada, proceso que rellena todos los pixeles conectados menores que un umbral preestablecido. Luego se convierte la imagen en negativo, convirtiéndose los píxeles blanco en negro y viceversa y después la imagen es erosionada. La imagen resultante de este proceso (**Figura 2.7**) se

procesa para obtener las coordenadas (X; Y) del borde en la imagen, que es la geometría del perfil del suelo.



Figura 2.7: Ejemplo de imagen, binarizada, rellenada y erosionada, para obtener la geometría del perfil del suelo.

Para graficar las coordenadas (X; Y) de la geometría del perfil del suelo con las medidas reales se realiza una correspondencia de centímetros a píxeles. La correspondencia se realiza conociendo que el largo de la imagen de la zona de información alineada es de 200 cm, esta medida podemos afirmarla gracias al recorte automático y también a la alineación de la imagen, ya que este último expulsa de la imagen toda la zona por fuera de los lados del patrón de calibración, el cual tiene 200 cm.

Una vez graficado las coordenadas con la correspondencia de centímetros a píxeles obtenemos la función de la geometría del perfil del suelo. Esta función tendrá mayor precisión si la resolución de la cámara es mayor, pues muestrea más datos.

2.3.4 Cálculo automático de los parámetros de la geometría del perfil del suelo.

Para calcular los parámetros de interés de la geometría del perfil del suelo se utiliza la función obtenida en el proceso de obtención del perfil del suelo. Se utiliza la función del Matlab *findpeaks* para detectar en la geometría del perfil del suelo las elevaciones y las calles del surco. Con la función de la geometría positiva se detecta los picos de las elevaciones y negativa se detecta los picos de las calles. Para definir los picos, de las elevaciones y calles, sobre los otros picos utilizamos como criterio la distancia entre picos, para esto el usuario debe introducir cuantas elevaciones y calles tomó en la foto y entonces se define la distancia como 200 cm dividido por el valor máximo entre las elevaciones y las

calles, en las **Figuras 2.8 y 2.9** se muestran un ejemplo de cómo se detectan las elevaciones en la función positiva y las profundidades en la función negativa, respectivamente.

Los parámetros hallados son alto máximo, ancho máximo y área de las elevaciones, profundidad máxima, ancho máximo y área de las calles. Para hallar las elevaciones y profundidades se halla la protuberancia de los picos hallados, parámetro que brinda la función *findpeaks*, en las **Figuras 2.8 y 2.9** se muestran un ejemplo de cómo se hallan las protuberancias de las elevaciones en la función positiva y las protuberancias de las profundidades en la función negativa. Los anchos se obtienen hallando digitalmente las coordenadas x de la base de los picos. Las áreas se obtienen procesando la imagen binarizada del perfil del suelo alineado con las coordenadas de la base del pico y del punto máximo del pico.

Las elevaciones y calles a las cuales se calculan sus parámetros, son las tomadas completamente en la foto; las que se encuentran en los bordes de la imagen no son calculadas ya que no fueron tomadas completamente y la información necesaria para conocer sus parámetros no se encuentra en la imagen.



Figura 2.8: Ejemplo de detección de las elevaciones y determinación de las protuberancias de las elevaciones, en la función positiva de la geometría del perfil del suelo.

En la **Figura 2.8** se observan las elevaciones identificadas con cabezas de flecha azules y las protuberancias con líneas de color marrón verticales. Las líneas horizontales de color amarillo son el ancho medio de los picos, este valor aunque es hallado automáticamente por la función *findpeaks*, no es utilizado en este trabajo, ya que el parámetro de ancho que es de interés es el ancho máximo. En este ejemplo, de las tres elevaciones halladas solo es calculado los parámetros de la segunda elevación, ya que la primera y segunda elevación, al encontrarse en los bordes de la imagen, no contienen todos sus muestreos; es por esto que las protuberancias halladas para estas elevaciones no son las reales.



Figura 2.9: Ejemplo de detección de las profundidades y determinación de las protuberancias de las profundidades, en la función negativa de la geometría del perfil del suelo.

En la **Figura 2.9** se observan las profundidades identificadas con cabezas de flecha azules y las protuberancias con líneas de color marrón verticales. Las líneas horizontales de color amarillo son el ancho medio de los picos, este valor aunque es hallado automáticamente por la función *findpeaks*, no es utilizado en este trabajo, ya que el parámetro de ancho que es de interés es el ancho máximo. En este ejemplo a las dos profundidades halladas se les calculan sus parámetros ya que ninguna de las dos se encuentra en los bordes.

2.4 Evaluación de los algoritmos

Para evaluar la veracidad de los resultados del método de alineación se realizó el experimento 1 y para analizar la variación de los resultados ante la variación de la perspectiva con que se toma la foto se realizó el experimento 2. El experimento 3 se realizó para evaluar las mejoras realizadas por el método de alineación con respecto al método de [3].

2.4.1 Experimento 1.

Para evaluar la efectividad del perfilómetro para alinear correctamente la imagen se realizaron pruebas, donde se pegaron con cinta adhesiva discos compactos en la zona de información del perfilómetro y se tomaron fotos desde distintas perspectivas (distintas distancias, alturas y ángulos). Luego se realizó el procesamiento de recorte y alineación a dichas fotos y se compararon con las mismas fotos sin alinear. A los discos alineados y sin alinear se les halló el eje mayor y menor, la excentricidad (parámetro que indica cuanto se asemeja a una circunferencia, 0 sería una circunferencia perfecta y 1 una línea), el área, la solidez (parámetro que indica cuánto se ajusta el área a la figura geométrica) y el perímetro; y se compararon las medidas con las medidas reales del disco.

2.4.2 Experimento 2.

Para evaluar la independencia del perfilómetro de la distancia, altura y ángulo con que es tomada la foto, se compararon las medidas, realizadas en el experimento 1, de algunas fotos alineadas tomadas a distintas distancias, alturas y ángulos y las medidas reales del disco.

2.4.3 Experimento 3.

Para evaluar las medidas, de los parámetros de interés, que mejora el método de alineación, con respecto al método de Cruz Díaz et al [3] se realizó mediciones con el perfilómetro diseñado en un campo de surco. A las fotos tomadas se les realizó en un caso todo el procesamiento automático y en el otro caso se realizó el recorte manual, la obtención del perfil y el cálculo de los parámetros de interés, sin el alineamiento, como describe el método de Cruz Díaz et al [3]. Los resultados de ambos métodos fueron comparados para evaluar las diferencias entre las medidas de los parámetros de interés tomados por ambos.

2.5 Interfaz Gráfica

Se creó una interfaz gráfica de sencilla estructura para facilitar el uso por el usuario. La interfaz gráfica permite al usuario cargar una o varias imágenes desde la barra de herramientas y una vez cargadas visualizarlas o borrarlas desde el **panel de imágenes**. El usuario puede seleccionar cualquier imagen cargada y mostrar la geometría del perfil del suelo (mediante el *push button* **geometría**) en el *axes* y sus parámetros (mediante el *push button* **parámetros**) en la tabla, también puede mostrar los parámetros promedios (mediante el *push button* **parámetros promedios**) de todas las imágenes cargadas. En la barra de herramientas el usuario tiene también la opción de guardar los resultados calculados y la opción de *data cursor* para saber los valores de cualquier punto de la geometría del perfil del suelo calculado.

Conclusiones del Capítulo

En el desarrollo del presente capítulo quedaron definidos los métodos de procesamiento automático de imagen, recorte, alineación, obtención del perfil y cálculo de los parámetros del perfil. Se confirmó el diseño de la herramienta de medición. Se definieron los experimentos realizados para la evaluación del método de alineación y para la comparación con el método de Cruz Díaz et al [3]. Se definió la estructura y funcionamiento de la interfaz gráfica del software.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados de las evaluaciones realizadas a los métodos de procesamiento diseñados en el capítulo 2. También muestra la comparación realizada entre el método de alineación diseñado y el método de Cruz Díaz et al [3].

3.1 Método de Recorte Automático

Después de varias pruebas realizadas al procesamiento del recorte automático los resultados mostraron que el programa recorta automáticamente sin problemas las dos imágenes, inclusive cuando la foto es tomada inclinada con respecto a la horizontal. Estos resultados se muestran en las **Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4**.



Figura 3.1: Imagen recortada automáticamente de la zona de calibración



Figura 3.2: Imagen recortada automáticamente de la zona de información.



Figura 3.3: Imagen recortada automáticamente de la zona de calibración donde la foto fue tomada con inclinación con respecto a la horizontal.



Figura 3.4: Imagen recortada automáticamente de la zona de información donde la foto fue tomada con inclinación con respecto a la horizontal.

En la **Figura 3.3** se observa cómo aunque el patrón de calibración se encuentra inclinado con respecto a la horizontal el recorte automático lo incluye completo, al igual que en la **Figura 3.4** incluye toda la zona de información.

3.2 Método de Alineación Automática

En este subcapítulo se muestran los resultados y discusión de los experimentos 1 y 2 realizados al método de alineación automática.

3.2.1 Experimento 1

Los resultados del Experimento 1 mostraron que las fotos alineadas mejoraron considerablemente la forma real de los discos con respecto a las fotos sin alinear. En la **Figura 3.5** se muestra una de las fotos tomadas en el Experimento 1.



Figura 3.5: Foto tomada para el Experimento 1.

Durante la realización del Experimento 1 se obtuvo la **Figura 3.6** que muestra dos imágenes binarizadas del disco negro de la **Figura 3.5**, sin alinear y alineado.



Figura 3.6: Imágenes del disco negro de la figura 3.5 sin alinear y alineado.

A las imágenes que muestra la **Figura 3.6** se les hallaron las propiedades que muestra la **Tabla I** con la función del Matlab *regionprops* y se compararon con las propiedades del disco ideal. Entre paréntesis se muestra el error cometido con respecto al disco ideal expresado en por ciento.

Disco	E. mayor	E. menor	Excent.	Área (cm ²)	Solidez	Perím. (cm)
	(cm)	(cm)			(%)	
No alin.	11,6	10,2 (15%)	0,47	93,5 (17,3%)	98,64	33,8 (10,3%)
Alin.	11,7	11,5 (4%)	0,20	105,8 (6,4%)	99,34	36,3 (3,7%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

Tabla 2.1: Comparación entre el disco negro sin alinear, alineado e ideal.

En la **Tabla 2.1** se muestra como, por la altura y ángulo con que es tomada la foto del Experimento 1, el disco sin alinear tiene gran diferencia entre el eje mayor y el eje menor alejándose más de su forma real de una circunferencia, medida que se ve reflejada con la excentricidad. También observamos que el error máximo en cuanto a distancia, con el disco ideal, que se comete es de un 15 % reflejado por el eje menor. El error que se comete en cuanto a perímetro es de 10,3 % y en cuanto a área de 17,3 %. Por la solidez podemos tener la certeza que el disco se ajusta a la elipse que utiliza la función *regionprops* para calcular estos parámetros.

Los parámetros del disco alineado muestran que la diferencia entre los dos ejes es de solo 2 milímetros acercándose en gran medida a su forma real de una circunferencia como así refleja la excentricidad, parámetro que mejoró con respecto al disco alineado en más de la mitad. Se observa como el error máximo en cuanto a distancia dado por el eje menor es de un 4 %, más de tres veces menor que el error en el disco no alineado. El error que se comete en cuanto a perímetro es de 3,7 %, aproximadamente tres veces menor que el error en el disco no alineado. El error que se de 6,4 %, aproximadamente tres veces menor que el error en el disco no alineado. Por la solidez podemos tener la certeza que el disco se ajusta a la elipse que utiliza la función *regionprops* para calcular estos parámetros.

A pesar de que la alineación mejora considerablemente la geometría real de los discos las medidas no llegan a ser exactamente las reales debido a que la distancia que hay entre la zona de calibración y la zona de información hace que la distorsión en la zona de información, debido al ángulo con que es tomada la foto, no sea exactamente la misma que la que hay en la zona de calibración y la transformada que se usa fue hallada para la zona de calibración.

Estos resultados demuestran que el método utilizando la alineación representa con mayor veracidad las medidas que el método de Cruz Díaz et al [3].

3.2.2 Experimento 2

Es importante explicar que la distancia y altura con que es tomada la foto influye únicamente en el ángulo con que es necesario colocar la cámara para poder tomar la imagen de interés. Los resultados en el Experimento 2 mostraron como el método de la alineación automática ante la distancia, altura y ángulo con que es tomada la foto muestra resultados semejantes que representan con gran veracidad la geometría real de la zona interesada. En **las Figuras 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11** se muestran las fotos utilizadas para este experimento.



Figura 3.7: Foto 1 utilizada para el Experimento 2.



Figura 3.8: Foto 2 utilizada para el Experimento 2.



Figura 3.9: Foto 3 utilizada para el Experimento 2.



Figura 3.10: Foto 4 utilizada para el Experimento 2.



Figura 3.11: Foto 5 utilizada para el Experimento 2.

Las fotos 1, 2 y 3 fueron tomadas a la misma distancia pero disminuyendo la altura y el ángulo respectivamente. La fotos 4 y 5 fueron tomadas aproximadamente a un metro más de distancia que las fotos 1, 2 y 3. La foto 4 fue tomada aproximadamente a la misma altura que la foto 1, pero como fue tomada a mayor distancia el ángulo es menor. La foto 5 fue tomada aproximadamente a la misma altura que la foto 3, pero como fue tomada a mayor distancia el ángulo es menor.

En la **Tabla 2.2** se muestra una comparación de las propiedades del disco negro sin alinear en las cinco fotos y del disco ideal. Entre paréntesis se muestra el error cometido con respecto al disco ideal expresado en por ciento.

Disco	E. mayor	E. menor	Excent.	Área (cm ²)	Solidez	Perím. (cm)
	(cm)	(cm)			(%)	
Foto 1	11,6	10,2 (15%)	0,47	93,5 (17,3%)	98,64	33,8 (10,3%)
Foto 2	11,6	10,5 (12,5%)	0,43	95,4 (15,7%)	98,86	34,1 (9,6%)
Foto 3	11,6	11,1 (7,5%)	0,29	101,7 (10,1%)	98,61	35,2 (6,6%)
Foto 4	11,6	11,1 (7,5%)	0,31	101,2 (10,5%)	98,39	34,9 (7,4%)
Foto 5	11,8	11,6 (3,3%)	0,18	107,6 (4,9%)	98,76	35,8 (5,0%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

Tabla 2.2: Comparación del disco negro sin alinear en las cinco fotos y el disco ideal.

En la **Tabla 2.2** se observa, en las fotos 1, 2 y 3, como a medida que el ángulo de captura disminuye la geometría del disco se acerca más a su forma real. La foto 4 aunque fue tomada a la misma altura que la foto 1 la geometría del disco mejora porque fue tomada a mayor distancia y el ángulo de captura disminuye. En la foto 5 la geometría del disco presenta los menores errores, pues por la distancia y altura con que fue tomada la foto el ángulo de captura es menor que en los otros casos, tomándose aproximadamente en un plano paralelo al plano del perfilómetro. Las medidas y los errores en los cinco casos varían considerablemente por la variación del ángulo de captura. La Tabla demuestra como a mayor ángulo de captura mayor la distorsión por perspectiva.

En la **Tabla 2.3** se muestra una comparación de las propiedades del disco negro alineado en las cinco fotos y del disco ideal. Entre paréntesis se muestra el error cometido con respecto al disco ideal expresado en por ciento.

Disco	E. mayor	E. menor (cm)	Excent.	Área (cm ²)	Solidez	Perím.
	(cm)				(%)	(cm)
Foto 1	11,7	11,5 (4%)	0,20	105,8 (6,4%)	99,34	36,3 (3,7%)
Foto 2	11,8	11,7 (2,5%)	0,13	108,8 (3,8%)	99,39	36,8 (2,4%)

Foto 3	11,9	11,7 (2,5%)	0,18	109,0 (3,6%)	99,43	36,8 (2,4%)
Foto 4	12,1	11,8 (1,7%)	0,25	112,3 (0,7%)	99,35	37,4 (0,8%)
Foto 5	12,1	11,8 (1,7%)	0,25	112,3 (0,7%)	99,36	37,4 (0,8%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

Tabla 2.3: Comparación del disco negro alineado en las cinco fotos y el disco ideal.

En la **Tabla 2.3** se muestra que en los cinco casos los errores cometidos son pequeños y mejoran en todo los casos considerablemente los resultados de la **Tabla 2.2**. La variación de las medidas y los errores en los cinco casos es pequeña. La pequeña variación que existe en las medidas es producto a que a medida que el ángulo de captura es mayor existe mayor diferencia de distorsión por perspectiva entre la zona de información y la zona de calibración, se ajusta menos a la zona de información. En las fotos 4 y 5 vemos que los resultados son muy semejantes, esto sucede porque a mayor distancia la altura no influye en gran medida en el ángulo de captura, haciendo que en ambos casos la diferencia de distorsión entre la zona de información y la zona de información no sea significante para la transformada hallada.

Podemos concluir que la variación de la distancia, altura y ángulo con que es tomada la foto no influye considerablemente en los resultados de la alineación.

Es importante explicar que cuando se utilice este perfilómetro para medir la geometría del perfil de suelos se debe tomar la foto con cierto ángulo de inclinación, porque si lo tomamos con un ángulo muy bajo puede que se superponga al perfil interesado otro perfil delantero. De aquí otra importancia a la alineación de la imagen, porque también es importante en otros usos que se pueda tomar la foto desde un plano paralelo para errores humanos que puedan ocurrir.

3.3 Comparación con el método de Cruz Díaz et al [3]. Experimento 3

Los resultados del Experimento 3 muestran cuánto mejora el método de alineación las medidas de los parámetros de interés en la geometría del perfil de suelos arados.

En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestran las fotos utilizadas para el Experimento 3.



Figura 3.12: Foto 1 utilizada para el Experimento 3.



Figura 3.13: Foto 2 utilizada para el Experimento 3.

Ambas fotos fueron tomadas a la altura de una persona promedio (1.80 m). La foto 1 es de 1 megapíxeles y la 2 de 12 megapíxeles. La foto 1 fue tomada en un terreno a pocos días de arado y la 2 fue tomada en ese mismo terreno arado luego que sobre el actuara los efectos de una lluvia intensa.

En las **Figuras 3.14 y 3.15** se muestran una comparación entre la geometría del perfil del suelo alineado y sin alinear de las fotos 1 y 2 respectivamente. En la **Tabla 2.4** se muestran los valores de los parámetros de interés de la geometría del perfil del suelo de las fotos 1 y 2. Entre paréntesis se muestra la mejora realizada al parámetro.



Figura 3.14: Comparación entre el perfil del suelo alineado y sin alinear de la Foto 1.



Figura 3.15: Comparación entre el perfil del suelo alineado y sin alinear de la Foto 2.

F o	Perfil	Elev. (cm)	Ancho (cm)	Area (cm ²)	Prof. 1	Ancho (cm)	Area (cm ²)	Prof. 2	Ancho (cm)	Area (cm ²)
t					(cm)			(cm)		
0										

1	No alin.	5,9	52,9	206,5	4,0	62,0	194,7	5,9	48,0	200,7
	Alin.	7,2 (1,3)	56,3 (3,4)	255,3 (48,8)	4,7 (0,7)	62,6 (0,6)	232,7 (38,0)	7,2 (1,3)	65,3 (17,3)	266,9 (66,2)
2	No alin.	5,3	80,5	231,1	5,3	105,0	277,5	6,0	62,9	235,0
	Alin.	6,5 (1,2)	86,2 (5,7)	292,4 (61,3)	5,7 (0,4)	100,9 (4,1)	277,2 (0,3)	6,5 (0,5)	62,4 (0,5)	252,2 (17,2)

Tabla 2.4: Parámetros de interés en la geometría del perfil del suelo de las Fotos 1 y 2.

Los parámetros calculados fueron para la segunda elevación y las dos calles, la primera y tercera elevación no son calculados sus parámetros por el programa, porque se encuentran en los bordes de la imagen y sus informaciones no se encuentran completamente. Los resultados mostrados en la **Tabla 2.4** muestran como la mejora del método de alineación a los parámetros de interés es significativa, notándose mejoras en cuanto a distancia de hasta 17,3 cm y en cuanto a área de hasta 66,2 cm².

3.4 Conclusiones del capitulo

Las pruebas realizadas al recorte automático mostraron la resistencia del método ante la variación del ángulo, con respecto a la horizontal, con que se toma la foto. Los resultados del Experimento 1 mostraron que el método de alineación mejora considerablemente la veracidad de la geometría hallada, por lo que demuestra que el método con la alineación de imagen es superior al método de Cruz Díaz et al [3]. Los resultados del experimento 2 demostraron que el método de la alineación de la imagen es resistente a las variaciones de las distancias, alturas y ángulos con que es tomada la fotografía, ya que sus resultados no variaron considerablemente. Los resultados del experimento 3 demostraron que la mejora de las medidas, de los parámetros de interés, halladas por el perfilómetro diseñado en este trabajo, con respecto a las halladas por el método de Cruz Díaz, (2015) son considerables, llegando a ser, las de este experimento, en cuanto a distancia de hasta 17,3 cm y en cuanto a área de hasta 66,2 cm².

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se diseñaron métodos automáticos para el recorte de la imagen, la alineación de la imagen, la obtención de la geometría del perfil y el cálculo de los parámetros de interés de la geometría del perfil.
- Se construyó una herramienta de medición acorde a los métodos automáticos diseñados y a las condiciones del terreno.
- 3. Se creó una interfaz gráfica que permite que el trabajo en el laboratorio sea sencillo.
- 4. El método de alineación representa con gran veracidad las medidas reales de la imagen tomada y no varía considerablemente sus resultados ante la variación de la distancia, altura y ángulo con que es tomada la foto.
- 5. El método de alineación mejora considerablemente la veracidad del perfil obtenido con respecto al método de Cruz Díaz et al [3].
- 6. El perfilómetro diseñado no presenta las desventajas del perfilómetro de varillas, ya que no modifica la zona de muestreo, es rápido el trabajo en el campo y puede tomarse las mediciones con una alta precisión utilizando una cámara de alta resolución. Tampoco presenta la desventaja del perfilómetro láser, ya que la alta iluminación existente en el terreno no lo afecta.

Recomendaciones

1. Construir la herramienta de medición de un material menos pesado que la madera como pudiera ser el acrílico.

2. Se pueden construir diferentes herramientas de medición para diferentes tipos de arados, así para arados de pequeña altura la herramienta de medición sería de menor altura disminuyendo así la diferencia de distorsión entre la zona de información y la zona de calibración cuando se toma la imagen, además sería la herramienta de más fácil manipulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Casanellas, J. L.-A. Reguerín, and M. R. d. Laburu, "Edafología para la agricultura y el medio ambiente," ed: Mundi-Prensa, Madrid, 1998.
- [2] M. C. Díaz, "Diseño de un nuevo apero para la labranza conservacionista en caña de azúcar," Maestría, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Villa Clara, 2014.
- [3] M. Cruz Díaz, M. Herrera Suárez, A. Taboada Crispi, and L. García Pedraza, "Determinación de la geometría del perfil del suelo mediante el método de tratamiento de imágenes," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 24, pp. 31-35, 2015.
- [4] R. G. Moreno, "Desarrollo de una metodología para la medición de la rugosidad superficial del suelo," Universidad Politécnica de Madrid, 2006.
- [5] R. J. A. Silveira, *Máquinas Agrícolas*, segunda edición ed. La Habana, 1980.
- [6] C.-h. Huang, I. White, E. Thwaite, and A. Bendeli, "A noncontact laser system for measuring soil surface topography," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 52, pp. 350-355, 1988.
- [7] S. Merrill, C. Huang, T. Zobeck, and D. Tanaka, "Use of chain set for scalesensitive and erosion-relevant measurements of soil surface roughness," in *10 th International soil conservation organization meeting*, 1999.
- [8] D. Cervantes Gómez, "Determinación de la geometría del perfil del suelo mediante el método de tratamiento de imágenes," Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas, 2013.
- [9] J. H. Camacho-Tamayo and G. A. Rodríguez, "Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo," *Agricultura técnica*, vol. 67, pp. 60-67, 2007.
- [10] I. Pérez Maturana, "Aplicación de un escáner láser industrial para la detección de cambios en microtopografía de las costras del suelo por humectación," 2013.

- [11] C.-h. Huang, "Quantification of soil microtopography and surface roughness. Fractals in soil science," *Advances in Soil Science. CRC*, 1998.
- [12] H. Kuipers, "A relief meter for soil cultivation studies," *Neth. J. Agric. Sci*, vol. 5, pp. 255-262, 1957.
- [13] W. Brian Whalley and B. R. Rea, "A digital surface roughness meter," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 19, pp. 809-814, 1994.
- [14] L. Wagner and Y. Yu, "Digitation of profile meter photographs," *Transactions of the ASAE*, vol. 34, pp. 412-0416, 1991.
- [15] A. Saleh, "Soil roughness measurement: chain method," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 48, pp. 527-529, 1993.
- [16] C. Rice, B. Wilson, and M. Appleman, "Soil topography measurements using image processing techniques," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 3, pp. 97-107, 1988.
- [17] M.-F. Destain, G. Descornet, C. Roisin, and M. Frankinet, "Investigation of soil degradation by means of an opto-electronic microreliefmeter," *Soil and Tillage Research*, vol. 13, pp. 299-315, 1989.
- [18] P. Bertuzzi, G. Rauws, and D. Courault, "Testing roughness indices to estimate soil surface roughness changes due to simulated rainfall," *Soil and Tillage Research*, vol. 17, pp. 87-99, 1990.
- [19] C.-h. Huang and J. M. Bradford, "Portable laser scanner for measuring soil surface roughness," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 54, pp. 1402-1406, 1990.
- [20] K. Helming, C. H. Roth, R. Wolf, and H. Diestel, "Characterization of rainfallmicrorelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs)," *Soil technology*, vol. 6, pp. 273-286, 1993.
- [21] F. Darboux and C.-h. Huang, "An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 67, pp. 92-99, 2003.
- [22] M. E. Barber, "Parametrización y optimización de modelos de inversión para la obtención de humedad del suelo a partir de datos satelitales de Radares de Apertura Sintética," Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, 2013.
- [23] A. Merel and P. Farres, "The monitoring of soil surface development using analytical photogrammetry," *The Photogrammetric Record*, vol. 16, pp. 331-345, 1998.
- [24] C. Gascuel-Odoux and P. Bruneau, "A morphological assessment of soil microtopography using a digital elevation model on one square metre plots," *Catena*, vol. 17, pp. 315-325, 1990.
- [25] R. Welch, T. Jordan, and A. Thomas, "A photogrammetric technique for measuring soil erosion," *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 39, pp. 191-194, 1984.

- [26] C. Gascuel-Odoux, P. Bruneau, and P. Curmi, "Runoff generation: assessment of relevant factors by means of soil microtopography and micromorphology analysis," *Soil Technology*, vol. 4, pp. 209-219, 1991.
- [27] M. L. Oelze, J. M. Sabatier, and R. Raspet, "Roughness measurements of soil surfaces by acoustic backscatter," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 67, pp. 241-250, 2003.
- [28] B. D. Lucas and T. Kanade, "An iterative image registration technique with an application to stereo vision," in *IJCAI*, 1981, pp. 674-679.
- [29] S. Baker and I. Matthews, "Lucas-kanade 20 years on: A unifying framework," *International journal of computer vision*, vol. 56, pp. 221-255, 2004.
- [30] M. J. Black and A. D. Jepson, "Eigentracking: Robust matching and tracking of articulated objects using a view-based representation," *International Journal of Computer Vision*, vol. 26, pp. 63-84, 1998.
- [31] G. D. Hager and P. N. Belhumeur, "Efficient region tracking with parametric models of geometry and illumination," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1025-1039, 1998.
- [32] M. Kristan, J. Matas, A. Leonardis, M. Felsberg, L. Cehovin, G. Fernandez, *et al.*, "The Visual Object Tracking VOT2015 Challenge Results," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*, 2015, pp. 1-23.
- [33] W. Mehner, M. Boltes, M. Mathias, and B. Leibe, "Robust Marker-Based Tracking for Measuring Crowd Dynamics," in *Computer Vision Systems*, ed: Springer, 2015, pp. 445-455.
- [34] Y. Wu, J. Lim, and M.-H. Yang, "Object tracking benchmark," *Pattern Analysis* and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 37, pp. 1834-1848, 2015.
- [35] J. R. Bergen, P. Anandan, K. J. Hanna, and R. Hingorani, "Hierarchical modelbased motion estimation," in *Computer Vision—ECCV'92*, 1992, pp. 237-252.
- [36] A. Eweiwi, M. S. Cheema, and C. Bauckhage, "Action recognition in still images by learning spatial interest regions from videos," *Pattern Recognition Letters*, vol. 51, pp. 8-15, 2015.
- [37] S. Zhou, W. Shen, D. Zeng, and Z. Zhang, "Unusual event detection in crowded scenes by trajectory analysis," in *Acoustics, Speech and Signal Processing* (*ICASSP*), 2015 IEEE International Conference on, 2015, pp. 1300-1304.
- [38] H.-Y. Shum and R. Szeliski, "Construction of panoramic image mosaics with global and local alignment," in *Panoramic vision*, ed: Springer, 2001, pp. 227-268.
- [39] G. E. Christensen and H. J. Johnson, "Consistent image registration," *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 568-582, 2001.
- [40] B. H. Lee, G. Xu, K. Gopalakrishnan, E. P. Ong, R. Li, D. W. K. Wong, *et al.*, "AEGIS-Augmented Eye Laser Treatment with Region Guidance for Intelligent Surgery," 2015.

- [41] M. Tao, J.-C. Su, T.-C. Wang, J. Malik, and R. Ramamoorthi, "Depth Estimation and Specular Removal for Glossy Surfaces Using Point and Line Consistency with Light-Field Cameras," 2015.
- [42] V. Ratner, Y. Gao, H. Lee, M. Nedergaard, H. Benveniste, and A. R. Tannenbaum, "Cerebrospinal Fluid and Interstitial Fluid Motion via the Glymphatic Pathway Modelled by Optimal Mass Transport," *bioRxiv*, p. 043281, 2016.
- [43] T. F. Cootes, G. J. Edwards, and C. J. Taylor, "Active appearance models," in *Computer Vision—ECCV'98*, ed: Springer, 1998, pp. 484-498.
- [44] G. J. Edwards, A. Lanitis, C. J. Taylor, and T. F. Cootes, "Statistical models of face images—Improving specificity," *Image and Vision Computing*, vol. 16, pp. 203-211, 1998.
- [45] L. Zhuang, T.-H. Chan, A. Y. Yang, S. S. Sastry, and Y. Ma, "Sparse illumination learning and transfer for single-sample face recognition with image corruption and misalignment," *International Journal of Computer Vision*, vol. 114, pp. 272-287, 2015.
- [46] A. Woodget, P. Carbonneau, F. Visser, and I. Maddock, "Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, pp. 47-64, 2015.
- [47] M. Gleicher, "Projective registration with difference decomposition," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. Proceedings., 1997 IEEE Computer Society Conference on,* 1997, pp. 331-337.
- [48] S. Baker and I. Matthews, "Equivalence and efficiency of image alignment algorithms," in Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on, 2001, pp. I-1090-I-1097 vol. 1.
- [49] G. D. Evangelidis and E. Z. Psarakis, "Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization," *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 1858-1865, 2008.
- [50] N. Otsu, "A threshold selection method from grey scale histogram," IEEETransactionsonSystemsManandCybernetics,1979.

ANEXOS

Anexo I Proceso de obtención de la geometría del perfil del suelo a partir de la fotografía tomada



Foto tomada en el campo.



Zona de calibración recortada.



Zona de información recortada.



Zona de calibración alineada.



Zona de información alineada.



Geometría del perfil del suelo alineado.

Anexo II Resultados individuales de las cinco fotos del Experimento 2

Disco	E. mayor	E. menor	Excent.	Área (cm ²)	Solidez	Perím. (cm)
	(cm)	(cm)			(%)	
No alin.	11,6	10,2 (15%)	0,47	93,5 (17,3%)	98,64	33,8 (10,3%)
Alin.	11,7	11,5 (4%)	0,20	105,8 (6,4%)	99,34	36,3 (3,7%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

10001.

Disco	E. mayor	E. menor	Excent.	Área (cm ²)	Solidez	Perím.
	(cm)	(cm)			(%)	(cm)
No alin.	11,6	10,5 (12,5%)	0,43	95,4 (15,7%)	98,86	34,1 (9,6%)
Alin.	11,8	11,7 (2,5%)	0,13	108,8 (3,8%)	99,39	36,8 (2,4%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

Foto	2.
------	----

Disco	E. mayor	E. menor	Excent.	Área (cm ²)	Solide	Perím.
	(cm)	(cm)			z (%)	(cm)

No alin.	11,6	11,1 (7,5%)	0,29	101,7 (10,1%)	98,61	35,2 (6,6%)
Alin.	11,9	11,7 (2,5%)	0,18	109,0 (3,6%)	99,43	36,8 (2,4%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

Foto	3.

Disco	E. mayor	E. menor	Excent	Área (cm ²)	Solide	Perím.
	(cm)	(cm)	•		z (%)	(cm)
No alin.	11,6	11,1 (7,5%)	0,31	101,2 (10,5%)	98,39	34,9 (7,4%)
Alin.	12,1	11,8 (1,7%)	0,25	112,3 (0,7%)	99,35	37,4 (0,8%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

10004.	Foto	4.
--------	------	----

Disco	E. mayor	E. menor	Excent.	Área (cm ²)	Solidez	Perím.
	(cm)	(cm)			(%)	(cm)
No alin.	11,8	11,6 (3,3%)	0,18	107,6 (4,9%)	98,76	35,8 (5,0%)
Alin.	12,1	11,8 (1,7%)	0,25	112,3 (0,7%)	99,36	37,4 (0,8%)
Ideal	12,0	12,0	0,00	113,1	100,00	37,7

Foto 5.

Anexo III Interfaz Gráfica

