



**SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL PARA EL ANÁLISIS
DINÁMICO DE UN CUERPO: ESTUDIO CUANTITATIVO DEL VULCANISMO
DE LODO.**

Presentado por:

Fis. LENNY ALEXANDRA ROMERO PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES
Octubre de 2006

**SISTEMA DE RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL PARA EL ANÁLISIS
DINÁMICO DE UN CUERPO: ESTUDIO CUANTITATIVO DEL VULCANISMO
DE LODO.**

Presentado por:

Fis. LENNY ALEXANDRA ROMERO PÉREZ

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Física

Director:

Dr. Jaime Enrique Meneses F.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES
Octubre de 2006

AGRADECIMIENTOS

Expreso sinceros agradecimientos:

- Al Dr. Jaime Meneses, por su paciencia, orientación y apoyo en la realización de este trabajo.
- A mi familia por su respaldo y su apoyo incondicional.
- A todas las personas que forman parte del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales.
- A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en al logro de este objetivo.

TITULO¹: Sistema de Reconstrucción 3D para el análisis dinámico de un cuerpo: Estudio cuantitativo del Vulcanismo de Lodo.

Lenny Alexandra Romero Pérez*

RESUMEN

En este trabajo se plantea una alternativa que permite reconstruir la forma 3D del cuerpo a partir de un sistema coordinado global. Un dispositivo de tratamiento digital estereoscópico permite determinar la posición absoluta de la cabeza óptica de reconstrucción. A partir de esta información la altura se determina con respecto a un sistema coordinado fijo, calculándose la forma 3D del cuerpo independientemente del desplazamiento masivo de la cabeza óptica. Básicamente el sistema óptico de Reconstrucción 3D a referencia global fijo implementado se basa en la triangulación láser y la visión estéreo. La visión estéreo se utiliza para calcular las coordenadas tridimensionales de los puntos del objeto que no se deforman y que sirven para calcular la ecuación del plano láser proyectado sobre el objeto. Con esta ecuación y con la imagen de la línea láser deformada por el cuerpo se calcula la topografía de la superficie. De esta manera aunque se proyecta láser sobre el objeto no se utiliza las ecuaciones básicas del método de triangulación láser. La parte esencial del procesamiento de imágenes es la calibración de las cámaras para realizar visión estéreo. El dispositivo se implementó para medir la variación temporal de la superficie externa en modelos análogos cualitativos de volcanes de lodo, causados por el impulso generado por gases al interior del volcán.

Palabras Claves: Reconstrucción 3D, calibración de cámaras, tratamiento digital de imágenes y triangulación láser.

¹ Trabajo de Investigación

*Autor: Jaime Meneses

**Director

Escuela de Física, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales - Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Universidad Industrial de Santander

TITLE²: Three-dimensional Reconstruction for dynamics analysis of objects: Quantitative study of mud volcanoes

Lenny Alexandra Romero Pérez*

ABSTRACT

This work shows an alternative that allows to reconstruct the 3D surface of the object from a global coordinate system. A device of stereoscopic digital treatment allows to determine the absolute position of the optical head of reconstruction. Using this information the height is calculated with respect to a global coordinate system. So, the 3D reconstruction is obtained independently from the optical head massive displacement. The implemented optical system of 3D Reconstruction is based on the laser triangulation and the stereoscopic vision. The stereoscopic vision is used to calculate the three-dimensional coordinates of the object points that do not become deformed and that serve to calculate the equation of the projected laser plane on the object. With this equation and the image of the laser line deformed by the object is calculated the topography of the surface objects. This way although laser projects on the object is not used the basic equations of the method of laser triangulation. The essential part of the image processing is the calibration of the cameras to make them stereoscopic. The device was implemented to measure the temporary variation of the external surface in analogous qualitative models of mud volcanoes caused by the impulsive forces of gases at the interior.

Keywords: 3D Reconstruction, camera calibration, digital image treatment and laser triangulation.

¹Trabajo de Investigación

*Autor

**Director: Jaime Meneses

Escuela de Física, Centro de Excelencia en Nuevos Materiales - Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales, Universidad Industrial de Santander.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---------------------|----|
| INTRODUCCIÓN | 13 |
|---------------------|----|

CAPITULO 1

| | |
|--|----|
| 1.1. Introducción | 17 |
| 1.2. Diapírismo y volcanes de lodo | 18 |
| 1.3. Modelos análogos físicos | 19 |
| 1.4. Sistemas de posicionamiento absoluto | 23 |
| 1.4.1. Sistema de posicionamiento global | 27 |
| 1.4.2. Reconstrucción 3D absoluta basada en información del objeto | 29 |

CAPITULO 2

| | |
|--|----|
| 2.1. Introducción | 31 |
| 2.2. Descripción del sistema | 32 |
| 2.2.1. Calibración de una cámara | 35 |
| 2.2.1.1. Modelos de cámara con distorsiones geométricas | 37 |
| 2.2.1.1.1. Distorsión radial | 39 |
| 2.2.1.1.2. Distorsión descentral | 39 |
| 2.2.2. Notación matricial | 39 |
| 2.2.2.1. Transformación Lineal Directa (DLT) | 42 |
| 2.2.2.2. Calculo de parámetros intrínsecos y extrínsecos | 43 |
| 2.3. Calibración de las cámaras utilizadas | 45 |
| 2.4. Análisis de error en el cálculo de los parámetros de calibración | 49 |
| 2.4.1. Distancia entre VR y VE y estimación del error para la cámara 1 | 54 |
| 2.4.2. Distancia entre VR y VE y estimación del error para la cámara 2 | 55 |

CAPITULO 3

| | |
|---|----|
| 3.1. Introducción | 59 |
| 3.2. Visión estéreo | 59 |
| 3.2.1. Imagen estereoscópica | 61 |
| 3.3. Proceso de reconstrucción 3D | 63 |
| 3.3.1. Imágenes adquiridas | 63 |
| 3.3.2. Procesamiento de imágenes | 64 |
| 3.3.2.1. Calculo de las coordenadas de los puntos homólogos A_1 y A_2 | 64 |
| 3.3.2.2. Calculo de las coordenadas de la línea láser | 66 |
| 3.3.2.3. Procedimiento de reconstrucción 3D | 66 |
| 3.4. Análisis de error en el cálculo de coordenadas tridimensionales | 69 |
| 3.5. Resultados experimentales | 72 |
| 3.5.1. Precisión | 72 |
| 3.6. Análisis cuantitativo del vulcanismo de lodo | 73 |
| 3.6.1. Diseño de modelos análogos | 74 |
| 3.6.2. Etapas de evolución temporal del volcán de lodo | 74 |
| 3.7. Monitoreos por inspección visual | 78 |
| 3.7.1. Modelo análogo 6U7 | 79 |
| 3.7.2. Modelo análogo 6U9 | 80 |
| 3.8. Monitoreos por reconstrucción 3D | 82 |
| 3.8.1. Modelo análogo 6U7 | 82 |
| 3.8.2. Modelo análogo 6U9 | 84 |

4. CONCLUSIONES GENERALES

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 1. Formación de díapiros y volcanes de lodo | 19 |
| Fig. 2. Configuración inicial del modelo análogo | 22 |
| Fig. 3. Modelo Análogo | 23 |
| Fig. 4. Digitalización de una imagen por medio de un sistema óptico de medida. | 24 |
| Fig. 5. Codificación de la topografía del cuerpo por el método de triangulación láser | 25 |
| Fig. 6. Reconstrucción 3D del cuerpo basándose en información del cuerpo que no se deforma | 30 |
| Fig. 7. Sistema óptico de reconstrucción 3D | 32 |
| Fig. 8. Geometría del sistema para calcular la ecuación de la línea en el espacio que pasa por cada punto de la línea láser | 34 |
| Fig. 9. Cuadrícula utilizada como patrón de calibración | 35 |
| Fig. 10. Sistemas coordenados utilizados para calibrar las cámaras | 37 |
| Fig. 11. Distorsión radial y tangencial | 38 |
| Fig. 12. Sistema coordenado de la cámara | 46 |
| Fig.13. Extracción de puntos de control de la imagen | 47 |
| Fig.14. Calculo de las coordenadas de los puntos en la imagen | 50 |
| Fig.15. Transformación Geométrica que relaciona píxeles distorsionados a no distorsionados | 51 |
| Fig.16. Relación de píxeles distorsionados a no distorsionados | 52 |
| Fig.17. Geometría para determinar las coordenadas de un punto en el espacio objeto | 52 |
| Fig.18. Estimación de coordenadas (X, Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración y para cada cámara. (a) CCD1 (b) CCD 2 | 53 |
| Fig.19. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD1 | 56 |
| Fig.20. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD 2 | 58 |
| Fig. 21. Imagen del punto P_i , según la perspectiva de cada cámara | 60 |

| | |
|--|----|
| Fig.22. Modelo del proceso de imagen estereoscópica para el caso de ejes ópticos paralelos | 61 |
| Fig.23. Proceso de imagen estereoscópica para el caso de ejes ópticos convergentes | 62 |
| Fig.24. Par de imágenes estereoscópicas registradas por las cámaras CCD utilizadas | 62 |
| Fig.25. Par de imágenes estereoscópicas (a) CCD 1 (b) CCD 2 | 63 |
| Fig.26. lintersección del plano láser con los puntos A_1 y A_2 que sirven de referencia global para reposicionar la reconstrucción tridimensional de la topografía del volcán | 64 |
| Fig.27. Determinación de las coordenadas de los puntos A_1 y A_2 . La línea roja indica los puntos con distorsión y la verde los puntos libres de distorsión | 65 |
| Fig.28. Determinación de los puntos representativos de la línea láser | 66 |
| Fig.29. Reconstrucción 3D de la superficie topográfica del volcán de lodo | 67 |
| Fig.30. Reconstrucción 3D en bruto del objeto | 68 |
| Fig.31. Reconstrucción 3D utilizando el método de interpolación | 68 |
| Fig.32. Posiciones (X,Y,Z) de los puntos homólogos del centro de masa del objeto de 100 mm de altura | 69 |
| Fig.33. Posiciones (X,Y,Z) de los puntos homólogos del centro de masa del objeto de 50 mm de altura | 71 |
| Fig. 34. Reconstrucción tridimensional del cuerpo utilizado | 72 |
| Fig. 35. Corte realizado sobre la figura de reconstrucción 3D | 73 |
| Fig. 36. Etapa 0 | 74 |
| Fig. 37. Etapa 1 | 75 |
| Fig. 38. Etapa 2 | 75 |
| Fig. 39. Etapa 3 | 76 |
| Fig. 40. Etapa 5 | 76 |
| Fig. 41. Etapa 6 | 77 |
| Fig. 42. Etapa 7 | 77 |
| Fig. 43. Medidas de Altura | 78 |

| | |
|---|----|
| Fig. 44. Evolución temporal del domo del volcán de lodo. | |
| Modelo analgo 6U7 | 79 |
| Fig. 45. Evolución temporal del domo del volcán de lodo | |
| Modelo analgo 6U9 | 81 |
| Fig. 46. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 0h de evolución | 82 |
| Fig. 47. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 47 h de evolución | 83 |
| Fig. 48. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 49 h de evolución | 83 |
| Fig. 49. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 117 h de evolución | 83 |
| Fig. 50. Relación entre el tiempo de evolución y la altura del domo | 84 |
| Fig. 51. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 0 h de evolución | 86 |
| Fig. 52. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 20 h de evolución | 86 |
| Fig. 53. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 38 h de evolución | 86 |
| Fig. 54. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 110 h de evolución | 86 |
| Fig. 55. Relación entre el tiempo de evolución y la altura del domo | 87 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Configuración de los materiales utilizados en el modelo análogo | 21 |
| Tabla 2. Características de las cámaras utilizadas | 45 |
| Tabla 3. Parámetros intrínsecos cámaras 1 y 2 | 48 |
| Tabla 4. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para la CCD1 | 55 |
| Tabla 5. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para la CCD2 | 58 |
| Tabla 6. Posición real y Posición encontrada de las coordenadas de centro de masa y cálculo de error para el objeto de 100 mm de altura | 70 |
| Tabla 7. Posición real y posición encontrada de las coordenadas de centro de masa y calculo de error para el objeto de 50 mm de altura | 71 |
| Tabla 8. Medidas de altura del domo del modelo 6U7 | 80 |
| Tabla 9. Medidas de altura del domo del modelo 6U7 | 81 |
| Tabla 10. Medidas de altura obtenidas por el sistema de reconstrucción 3D | 83 |
| Tabla 11. Medidas de altura obtenidas por el sistema de reconstrucción 3D | 87 |

INTRODUCCIÓN

La reconstrucción 3D por vía óptica, es el proceso mediante el cual, la topografía de un objeto es digitalizada. Es decir, a partir de un sistema de referencia (X, Y, Z), se calculan digitalmente las coordenadas de los puntos observados en la superficie de un cuerpo. Debido a la naturaleza bidimensional de los dispositivos de digitalización de imágenes, los métodos ópticos de reconstrucción 3D permiten codificar la información tridimensional mediante diferentes alternativas tales como: deformación de una línea proyectada sobre el cuerpo, variación bidimensional del paso y orientación de franjas proyectadas o retardo temporal de pulsos enviados a la superficie, por ejemplo. De esta manera, una variable de naturaleza óptica es alterada en función de la topografía de la superficie del cuerpo. Los métodos ópticos tradicionales de reconstrucción 3D han despertado especial interés en aplicaciones industriales y médicas, debido a sus características no invasivas, bajo costo de implementación y excelentes resoluciones.

En esta investigación se plantea una alternativa que permite reconstruir tridimensionalmente la superficie de un cuerpo cuyo tamaño varía en función del tiempo, con presencia de discontinuidades y baja reflectividad. Esto implica que la adaptación del método óptico escogido para realizar la reconstrucción 3D debe resolver la topografía complicada y adicionalmente permitir el análisis de la evolución temporal de su superficie.

Al pensar en aplicar cierta técnica de reconstrucción se deben tener en cuenta las características reales de los objetos a estudiar, tales como: grado de absorción, luminosidad y tamaño. También, existen objetos que tienen variaciones abruptas de altura y variaciones fuertes de la pendiente de la superficie, estas características representan un problema en el proceso de reconstrucción para algunas técnicas ópticas. Desde este punto de vista pueden llamarse objetos complicados o discontinuos. De igual manera, en ambientes industriales, existen situaciones donde se requiere calcular la forma

tridimensional de objetos que evolucionan con el tiempo. Un ejemplo de ello se evidencia en la aparición y el crecimiento temporal de ampollas en películas de pintura generadas por la corrosión, o la variación de la topografía externa de sedimentos orgánicos por la presión interna de gases. Por lo tanto, para realizar un análisis metrológico dinámico, se hace necesario implementar un sistema de medida por reconstrucción tridimensional que permita evaluar objetos complicados y variaciones temporales de su topografía.

Uno de los métodos ópticos de reconstrucción tridimensional que clásicamente se utiliza en el diseño de instrumentos de medidas 3D, es el método de triangulación láser. En este método se proyecta un patrón láser (punto, línea, etc.) formando un ángulo conocido con respecto al eje óptico de la cámara CCD. Midiendo la deformación geométrica del patrón láser con respecto al patrón proyectado sobre el plano de referencia donde se ubica el cuerpo, se puede obtener la altura del objeto. Para el desarrollo de este método es necesario hacer un barrido unidimensional o bidimensional al cuerpo según se proyecte una línea o un punto, respectivamente. En este caso no hay problema con objetos discontinuos ni con las sombras generadas por el cuerpo, pero requiere de un sistema de barrido unidimensional o bidimensional dependiendo del patrón proyectado.

Estos sistemas calculan la forma 3D a partir de un plano de referencia que fija el sistema de medida, y generalmente corresponde al plano objeto del sistema óptico de la CCD. Si se desplaza dicho sistema de coordenadas, se desplazaría la forma 3D y no sería posible calcular la forma absoluta del cuerpo con respecto a un sistema coordenado global-fijo.

Debido a que las técnicas de reconstrucción tridimensional, generan valores de alturas a posiciones relativas, (de acuerdo a donde se ubique el objeto con respecto al plano de referencia), este trabajo de investigación se centra en la necesidad de diseñar un sistema que permita calcular las variaciones de la forma tridimensional de manera absoluta con respecto a un sistema

coordinado global. La forma 3D de la topografía del objeto se obtiene a partir de un sistema coordinado interno relativo al plano de referencia.

Desplazando el sistema óptico de reconstrucción con respecto al cuerpo, se desplaza el plano de referencia y se reconstruye la topografía del cuerpo, perdiéndose la información global del desplazamiento. Esta situación dificulta el análisis de fenómenos dinámicos donde se procesan las variaciones de la topografía medidas en instantes diferentes y a posiciones relativas entre el objeto y el sistema óptico.

Con el fin de comparar secuencialmente la topografía del cuerpo, es importante calcular la forma 3D usando un sistema coordinado global-fijo independiente de la posición relativa sistema óptico / objeto. Por lo tanto se plantea el desafío de calcular la posición del sistema óptico con respecto a un sistema coordinado fijo, para posteriormente determinar la forma 3D absoluta del cuerpo. Se presentan diferentes alternativas, por un lado se puede implementar un sistema de posicionamiento global GPS (Global Position System) o usar puntos del objeto que no se deformen al variar su topografía en función del tiempo. Esta última situación depende del objeto de estudio, identificando puntos que no se deformen con respecto al tiempo. De esta manera la reconstrucción 3D del objeto se hace independiente de la posición relativa del sistema óptico / objeto. Una aplicación directa que tendrá un sistema de medida 3D de estas características sería el análisis en función del tiempo del vulcanismo de lodo, tema que se discutirá mas adelante. Esta aplicación justifica la necesidad de diseñar un sistema de estas características.

Básicamente el sistema óptico de reconstrucción 3D a referencia global-fijo implementado se basa en la triangulación láser lineal y la visión estéreo. La visión estéreo se utiliza para calcular las coordenadas tridimensionales de los puntos del objeto que no se deforman y que sirven para calcular la ecuación del plano láser proyectado sobre el objeto. Con esta ecuación y con la imagen de la línea láser deformada por el cuerpo se calcula la topografía de la superficie.

De esta manera aunque se proyecta un plano láser sobre el objeto no se utiliza las ecuaciones básicas del método de triangulación láser. La parte esencial del procesamiento de imágenes es la calibración de las cámaras para realizar visión estéreo. De esta manera, este trabajo se distribuye así: En el primer capítulo se revisa rápidamente las bases de la reconstrucción 3D y la triangulación láser. En el segundo capítulo se analiza el proceso de calibración de las cámaras CCD utilizadas y el análisis de error que introduce el cálculo de los parámetros de las cámaras. En el capítulo 3 se analiza el método de Reconstrucción 3D implementado y el análisis de error en el cálculo de las coordenadas tridimensionales de un punto sobre la superficie del objeto. Finalmente, se presentan las conclusiones y perspectivas del trabajo realizado.

CAPÍTULO 1

1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta de manera general los conceptos básicos del fenómeno de diapirismo y volcanes de lodo, la manera en que se generan y un estudio de la evolución topográfica de estos a través del tiempo. Una forma de abordar el estudio de la formación de las estructuras diapíricas es mediante modelos análogos físicos. Los modelos análogos permiten aislar variables que influyen en un sistema para evaluar su contribución relativa al fenómeno [1]. Los modelos análogos físicos son modelos de laboratorio que permiten obtener replicas simplificadas de sistemas naturales a escala de laboratorio, y ofrecen la oportunidad de investigar la influencia individual de diferentes parámetros de manera controlada. De esta manera, es posible definir un modelo matemático que se ajuste al fenómeno físico. La precisión explicativa del modelo depende del error que se comete entre los valores de las variables de salida esperados y los medidos experimentalmente. Para el caso de los volcanes de lodo, la principal variable de salida explicativa del fenómeno es la variación de la superficie externa, debida a la presión de los gases generados al interior. Por lo tanto, la principal variable a medir es la evolución temporal de la topografía externa del volcán.

Con el fin de contribuir en el proceso explicativo del diapirismo y la formación de volcanes de lodo, se construye un sistema de reconstrucción 3D que tenga en cuenta las condiciones que impone el objeto a medir. A continuación se mostrará de manera global el fenómeno de diapirismo y la construcción de modelos análogos asociados al fenómeno. De esta manera se definirán las condiciones experimentales que se deben imponer al sistema de medida 3D.

1.2. DIAPIRISMO Y VOLCANES DE LODO

Los diapíros y volcanes de lodo son estructuras aproximadamente verticales formadas por el ascenso de lodo a través de una columna de roca como se muestra en la figura 1 [2]. Estos fenómenos geológicos hasta el momento no se encuentran completamente definidos y su comprensión aún no es definitiva. Su distribución mundial es amplia y variada, y está asociada a diversos ambientes geológicos, presentándose tanto en tierra como en zonas del litoral marino. La importancia y estudio de estos fenómenos incluyen el campo geológico estructural, sedimentológico, geomorfológico, e incluso tiene implicaciones biológicas y sociales, tanto por el atractivo que generan, como por la amenaza que eventualmente algunos pueden representar por diferentes factores, entre ellos las fugas de gas, inestabilidad del terreno, etc.

El diapírismo es el ascenso vertical y espontáneo debido a la inversión gravimétrica producida por la diferencia de densidades entre un material subyacente de baja densidad y con tendencia a fluir, y un material de mayor densidad suprayacente. Los diapíros más conocidos y estudiados son aquellos formados por el ascenso de lodo a través de un cuerpo rocoso. Estos diapíros conocidos como diapíros de lodo, presentan una estructura geomorfológica característica en forma de domos. Dependiendo de la evolución temporal se pueden presentar en la superficie grietas o cráteres en donde se observa el ascenso del lodo y burbujas de gas. Esta evolución temporal del crecimiento del domo puede brindar información a cerca del proceso que los generó.

Una forma de abordar el estudio de la formación de las estructuras diapíricas es mediante modelos análogos físicos. Estos permiten aislar variables que influyen en un sistema para evaluar su contribución relativa al fenómeno [1].

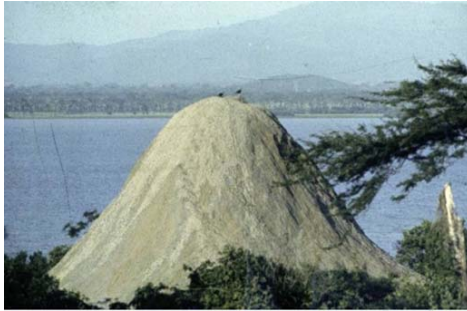
A continuación se muestran algunas imágenes que documentan el fenómeno:



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Formación de Diapiros y Volcanes de lodo. **(a)** y **(b)** Formación de volcán de lodo en Turbaco (Cercanías de Cartagena). **(b)** Cráteres gemelos formados por el fenómeno diapirismo, (el diámetro de cada cráter es de aproximadamente 40 cm). **(c)** y **(d)** Volcán de lodo Totumo, ubicado en Galerazamba, entre Cartagena y Barranquilla. **(c)** Fotografía registrada Volcán del Totumo en el año de 1979. **(d)** Fotografía registrada del Volcán del Totumo en el año de 2005.

1.3. MODELOS ANÁLOGOS FÍSICOS.

Los modelos análogos son réplicas simplificadas de sistemas naturales en el laboratorio [1]. Han sido aplicados para estudiar los procesos geológicos desde principios del siglo XIX, ayudando a comprender cualitativa y cuantitativamente problemas geológicos específicos. La ventaja de los modelos análogos es que ofrecen la oportunidad de investigar la influencia individual de diferentes parámetros en los procesos geológicos. Adicionalmente, las condiciones límites pueden fijarse de acuerdo a las necesidades del experimentador. También, ofrecen la oportunidad de estudiar la evolución estructural tridimensional de un modelo específico, así brindan una imagen

cinemática coherente, la cual puede ayudar con la interpretación de prototipos naturales.

De acuerdo con Hubbert (1937) un modelo análogo es un buen representante de un prototipo natural, si sigue los tres aspectos de similaridad: geometría, cinemática y dinámica. Desde Hubbert, muchas otras investigaciones acerca del escalamiento de modelos análogos aplicados a procesos naturales, se han realizado. Según todos estos estudios, los modelos análogos son representativos de un prototipo natural si son escalados apropiadamente y si los materiales usados muestran un comportamiento reológico similar a los prototipos naturales. Otros parámetros que necesitan ser apropiadamente escalados para análisis cuantitativo son la cohesión, viscosidad, tiempo, densidad y longitud o área. Debido a estas reglas de escalamiento, solamente materiales específicos son apropiados para usar en modelos análogos simulando procesos geológicos. Esta opción depende principalmente del rango de la escala espacio-temporal entre el prototipo natural y el modelo.

Para realizar los procedimientos experimentales de los montajes de los modelos análogos en el laboratorio, se deben fijar condiciones bajo las cuales serán llevados a cabo dichos experimentos, además se debe establecer un control, es decir, saber qué variable o conjunto de variables se van a observar y bajo qué parámetros. Se debe tener muy claro que no se puede hacer deducciones con base en un solo experimento; por ende es necesario acordar desde un principio los materiales a utilizar, el método con el cual se realizarán las medidas, las escalas en las cuales se trabaja y un número de replicas que lleven a resultados significativos, [1].

Al iniciar los montajes de los modelos análogos se dio especial énfasis a las características reológicas de los materiales. Igualmente se investigaron las metodologías para la construcción de dicho modelos. La experimentación contó con cuatro etapas. La primera consistió en generar un inventario de las variables físicas que podían ser modeladas en el laboratorio. La segunda etapa

inicio con la observación de que el mecanismo propulsor del diapirismo podía ser debido a la presencia de gases generados y/o contenidos en el lodo. La segunda etapa finalizó con la selección de la variable que define el contenido de materia orgánica como parámetro modelado en el laboratorio. La tercera etapa sirvió para definir la configuración experimental de manera que se asegurará total control sobre la variable contenido de materia orgánica. La cuarta etapa consistió en el montaje de los experimentos finales.

Una vez realizadas varias configuraciones fallidas de replicas de modelos análogos y teniendo en cuenta las etapas anteriores se optó por la siguiente configuración como montaje final: Capa base de lodo de 7 cm de espesor; capa impermeabilizante de gelatina (1 cm); capa tope de arena (3 cm). La tabla 1, muestra la proporción de materiales utilizados para crear el modelo analógico.

| MODELO ANALÓGICO | ESPESOR (cm) |
|-----------------------------------|---------------------|
| Capa Tope (Arena) | 3 |
| Capa Impermeabilizante (Gelatina) | 1 |
| Capa Base (Lodo) | 7 |

Tabla 1. Configuración de los materiales utilizados en el modelo análogo

Es importante destacar que el presente trabajo de investigación se realizó en cooperación con la escuela de geología de la UIS, donde se realizaron las investigaciones anteriores y se definieron las variables del modelo análogo de la anterior composición definitiva [3]. La figura 2 muestra un modelo analógico a escala diseñado en laboratorio. Este modelo se elaboró en cajas de vidrio de 20 cm x 20 cm x 16 cm. (alto).

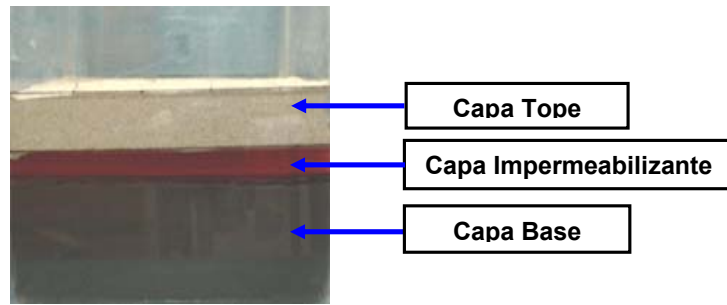


Fig. 2. Configuración inicial del modelo análogo

Como se mencionó anteriormente, en el diseño del modelo análogo se definen las variables de entrada al modelo y las variables principales de salida. Según el análisis realizado anteriormente, la variación de la altura máxima del domo en función del tiempo define la principal variable a medir en el proceso de caracterización físico-química del fenómeno. Por lo tanto, es importante medir la variación temporal de la superficie externa de los modelos análogos de volcanes de lodo causados por el impulso generado por gases al interior del volcán. La figura 3 muestra una serie de imágenes de un modelo análogo en sección transversal y sección aérea, donde se ilustra la variación del domo en función del tiempo.

Tradicionalmente, el geólogo mide la variación temporal de la altura máxima del domo con una regla métrica. Con el fin de obtener más información y medir este comportamiento dinámico, se hace necesario calcular la forma tridimensional de la superficie en cualquier instante. Observando la figura 3, se determina que la superficie del objeto presenta baja reflectividad, variaciones apreciables de la forma externa, las grietas en la superficie generan discontinuidades y zonas negras. Por lo tanto, para realizar un análisis metrológico dinámico, se debe implementar un sistema de medida por reconstrucción tridimensional que permita evaluar objetos complicados con variaciones temporales de su topografía. De igual manera, como se pretende medir la variación temporal de varios modelos análogos, es importante que el sistema de medida se pueda desplazar para medir cada modelo.

1.4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO ABSOLUTO

La figura 4 muestra el esquema utilizado en un sistema de reconstrucción tridimensional. El sistema de medida codifica la altura de cada punto muestreado de la superficie del objeto 3D. El sistema coordinado (X_s , Y_s , Z_s) intrínseco del sistema de medida define la reconstrucción 3D del objeto. La topografía del objeto está definida como $Z_s = F(X_s, Y_s)$. El plano $Z_s=0$ generalmente llamado plano de referencia corresponde al plano de focalización del sistema formador de imágenes utilizado. El campo de observación transversal y la profundidad de campo del sistema de observación definen el volumen de calibración del sistema de medida.

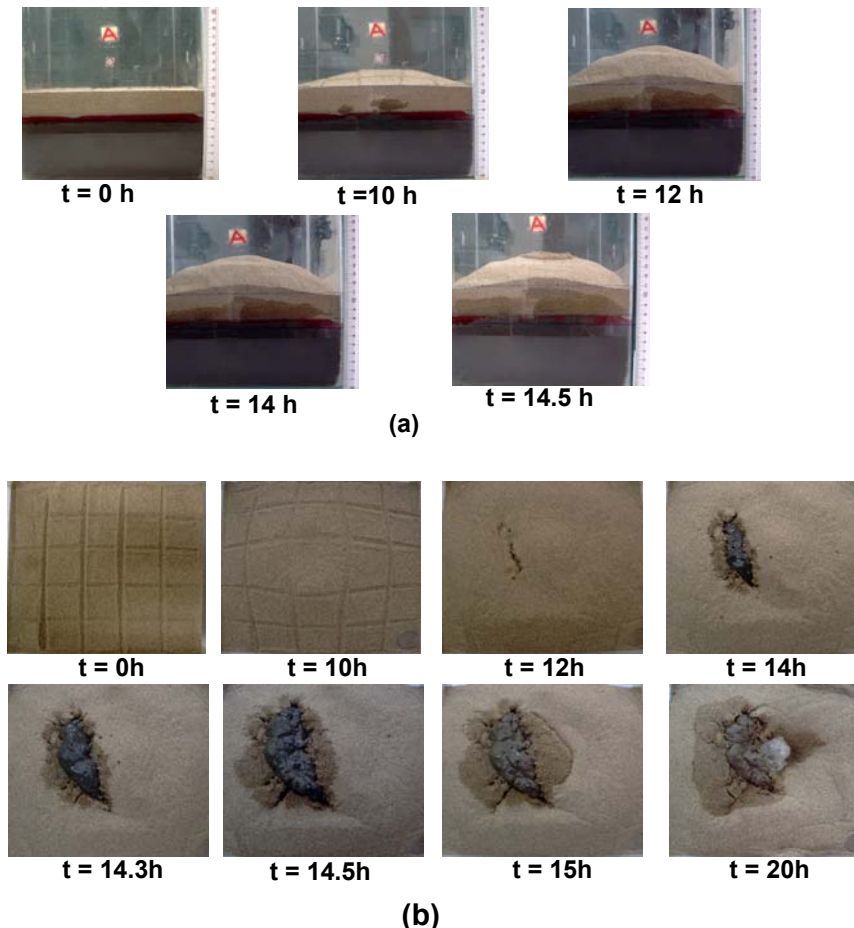


Fig. 3. Modelo Análogo: Capa tope (Lodo orgánico) + Capa impermeabilizante (gelatina) + Capa base (arena media-fina). **(a):** Evolución vista transversal. **(b):** Evolución en vista aérea.

La superficie del objeto u objetos observables por el sistema puede ser reconstruido, con una precisión que la define el procedimiento interno de reconstrucción. Tradicionalmente, una curva de calibración permite calcular la altura de la superficie del cuerpo en función de los parámetros del sistema y de la variable óptica utilizada en la codificación medida a partir del plano de referencia. Cualquier desplazamiento masivo del cuerpo al interior del volumen de calibración, no afecta la topografía del cuerpo, solo introduce un término de altura constante.

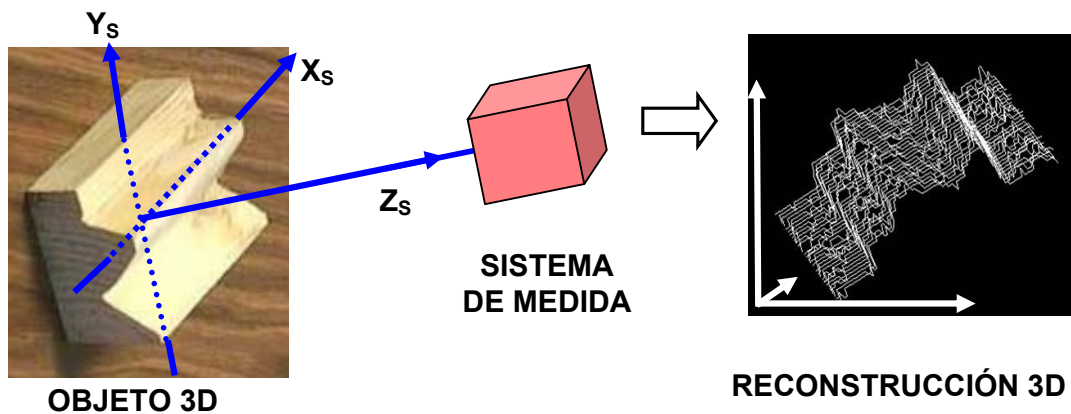


Fig. 4. Digitalización de una imagen por medio de un sistema óptico de medida.

El anterior análisis se ilustra en la figura 5 usando el método de triangulación láser. Este método consiste en iluminar el cuerpo con un patrón especial que puede ser un punto o una línea. La intersección entre la iluminación proyectada y la superficie del cuerpo a reconstruir, produce un patrón deformado dependiendo de la forma y dimensiones del cuerpo. El montaje consta de un sistema de proyección láser, un sistema de observación y un sistema de desplazamiento, que realiza el barrido unidimensional o bidimensional al cuerpo según se proyecte una línea o un punto, respectivamente.

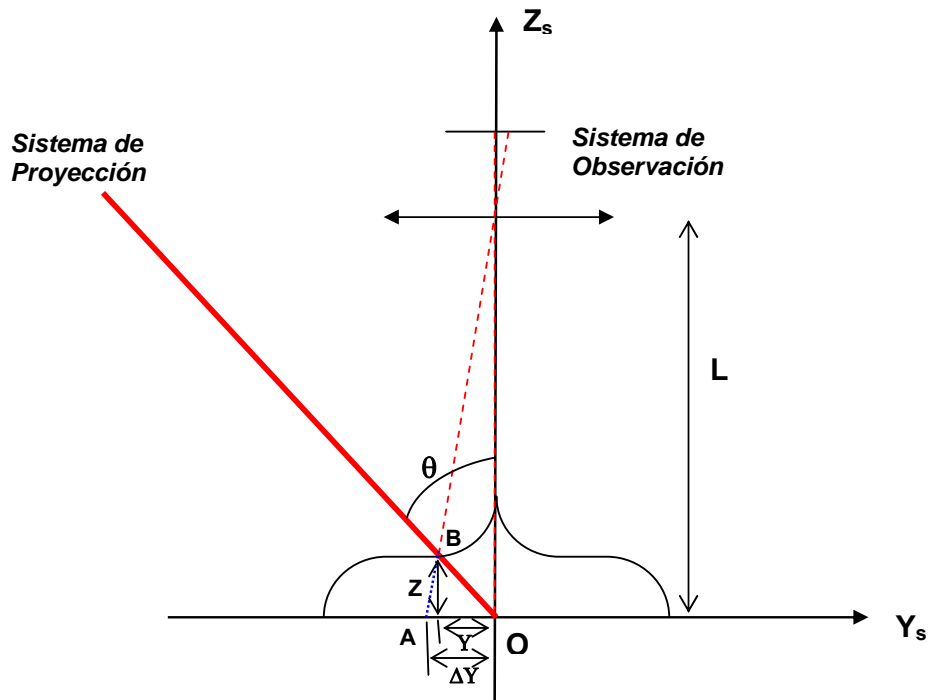


Fig. 5. Codificación de la topografía del cuerpo por el método de triangulación láser.

El sistema de proyección focaliza una línea láser sobre el objeto a analizar. La imagen de la línea deformada es digitalizada por medio del sistema de observación. Tradicionalmente se utiliza una cámara CCD y una tarjeta de digitalización de imágenes. El plano de referencia, $Z_s=0$, se focaliza sobre el plano de sensores de la CCD. Proyectando el patrón láser sobre el plano de referencia, sin la presencia del objeto, la imagen formada será un punto o una línea recta sin deformación, que corresponde a O en la figura 5. Sin embargo ubicando al objeto, el patrón láser se deformará con respecto a la línea de referencia ($Z=0$ mm). La proyección del patrón láser es interceptada en B y proyectada en A por el sistema de observación. Se asume que el centro de la pupila de entrada se ubica sobre el centro de la lente usada por el sistema de observación. Un modelo más simplificado asume que el centro de la pupila de entrada se ubica en el infinito, obteniéndose un rayo principal paralelo al eje óptico, modelo telecéntrico de formación de imágenes.

La altura Z del punto B genera un desplazamiento OA del patrón láser. Usando relaciones geométricas, el desplazamiento y la altura se relacionan, a partir de la ecuación:

$$Z = \frac{L\Delta Y}{(\Delta Y + L \tan(\theta))} \quad (1)$$

Donde ΔY es la deformación de la línea con respecto a la imagen de la línea a $Z=0$ mm, θ es el ángulo entre los ejes ópticos de proyección y observación y Z la altura del punto sobre el cuerpo, como se indica en la figura 5. El procedimiento de reconstrucción tridimensional se realiza adquiriendo las imágenes del patrón láser sin y con objeto. Una vez adquiridas las imágenes, se procede a realizar un tratamiento digital para calcular el desplazamiento del patrón láser y convertirlo en desplazamiento en milímetros sobre el plano de referencia. Utilizando la ecuación 1 se obtiene la altura del cuerpo para los puntos digitalizados de su superficie. El error que se introduce en la determinación de la altura es determinado principalmente por la precisión al medir los parámetros del sistema. Procedimientos experimentales de calibración son utilizados tradicionalmente para obtener una relación experimental entre la deformación y la altura. Clásicamente se obtiene desplazando el plano de referencia a intervalos regulares en Z y calculando ΔY . El anterior procedimiento permite calcular la altura Z del punto asociada al punto A sobre el plano de la figura. Un procedimiento adicional de calibración es necesario para convertir las coordenadas sobre el plano de referencia del punto A a las coordenadas del punto B, que está asociada a la altura Z calculada y que fijan las coordenadas reales de la topografía del cuerpo. Este procedimiento de calibración de coordenadas espaciales se realiza o usando las ecuaciones de la óptica geométrica o usando algoritmos tradicionales de calibración de cámaras [1]. De igual manera, para obtener la reconstrucción 3D de la superficie del cuerpo, es necesario realizar un barrido bidimensional del punto láser proyectado o un barrido unidimensional de la línea láser. En cualquiera de los dos casos, es necesario conocer con precisión, los desplazamientos realizados al patrón láser proyectado sobre la superficie.

Asumiendo que el objeto se deja quieto, y se desplaza todo el sistema de medida, la reconstrucción 3D tendría la misma forma del objeto, excepto que hay una altura constante adicional. Si entre dos instantes temporales consecutivos el objeto altera su topografía, y en ese rango de tiempo el sistema de medida se desplaza, no se podría calcular la deformación constante sufrida por la superficie del cuerpo, solo se calcularía la variación en la forma de la topografía. Si se pretende realizar un análisis dinámico de la superficie del cuerpo, es necesario hacer la reconstrucción 3D con respecto a un sistema coordinado global-absoluto, independiente del sistema coordinado intrínseco del sistema de medida.

Estos sistemas absolutos pueden basarse en dos métodos fundamentales: el uso de sistemas de posicionamiento global ó a partir de referencias de un punto del objeto cuya posición y altura no varía con el tiempo. En este último caso, los puntos fijos en la superficie del cuerpo sirven para reposicionar la forma tridimensional obtenida, independiente del desplazamiento del sistema de medida con respecto al objeto.

1.4.1. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

La reconstrucción 3D absoluta consiste en determinar la posición exacta del sistema coordinado intrínseco con respecto al origen del sistema coordinado global. La idea de obtener este posicionamiento se basa en el principio del posicionamiento global satelital, que es importante revisar para comprender como se puede implementar a pequeña escala.

El sistema de posicionamiento global, es un Sistema Global de Navegación por Satélite el cual permite determinar el cálculo de coordenadas tridimensionales de la posición de una persona, un vehículo o una embarcación, con una precisión de entre cuatro metros y quince metros. El sistema fue desarrollado e instalado, y actualmente es operado, por el Departamento de Defensa de los

Estados Unidos, con el objeto de obtener en tiempo real la posición de un punto en cualquier lugar de la tierra. Este sistema se ha incorporado masivamente a todo tipo de trabajos que necesitan de una precisión exhaustiva a la hora de determinar la posición en que se encuentra cualquier objeto sobre nuestro planeta.

El sistema de posicionamiento global funciona mediante una red de satélites basada en señales de radio emitidas por 21 satélites activos en órbita alrededor de la tierra a una altura de aproximadamente 20.000 km. Cuando se desea determinar la posición, el aparato que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo cuatro satélites de la red, de los que recibe señales indicando la posición y el reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del sistema de posicionamiento global y calcula el retraso de las señales, es decir, la distancia al satélite. Por “triangulación” se calcula la posición en que éste se encuentra. La triangulación en el caso del sistema de posicionamiento global, a diferencia del caso 2-D que consiste en averiguar el ángulo con respecto a puntos conocidos, se basa en determinar la distancia de cada satélite respecto al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los tres satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene las posiciones absolutas o coordenadas reales del punto de medición.

Usando la idea anterior, en la implementación a pequeña escala se deben utilizar emisores y receptores fijos, con respecto al sistema coordinado global y un emisor fijo al dispositivo de medida, para conocer su posición global. Adicionalmente se debe calcular la orientación del sistema coordinado intrínseco del sistema de medida. Este trabajo de investigación está en curso de realización, donde se pretende hacer la reconstrucción tridimensional de un objeto desplazando libremente el sistema de medida alrededor del cuerpo.

1.4.2. RECONSTRUCCIÓN 3D ABSOLUTA BASADA EN INFORMACIÓN DEL OBJETO

Debido a que las técnicas de reconstrucción tridimensional, generan valores de alturas a posiciones relativas, (de acuerdo a donde se ubique el plano de referencia), si el sistema óptico de reconstrucción se desplaza con respecto al cuerpo, también lo hace el plano de referencia reconstruyéndose la topografía del cuerpo, pero perdiéndose la información global del desplazamiento. Esta situación dificulta el análisis de fenómenos dinámicos donde se procesan las variaciones de la topografía medidas en instantes diferentes y a posiciones relativas entre el objeto y el sistema óptico. En esta investigación se pretende diseñar un sistema que permita calcular las variaciones de la forma tridimensional de manera absoluta con respecto a un sistema coordinado global para objetos que cambian su topografía externa y que presentan puntos en su superficie que no se deforman a través del tiempo.

La figura 6 ilustra lo anterior, el objeto de interés es un modelo análogo de un volcán de lodo que genera gases al interior de la capa de lodo. La superficie del cuerpo se deforma, excepto los puntos que pertenecen al borde de la caja. El sistema de observación y el de proyección conforman un dispositivo óptico compacto utilizado para desplazarlo y medir la topografía del cuerpo en diferentes instantes. Los puntos A_1 y A_2 inherentes al sistema coordinado interno corresponden a la intercepción de este sistema con el plano láser que es generado por el dispositivo S. Como estos puntos no se deforman, su posición tridimensional sirve para reposicionar la reconstrucción 3D de la superficie en cualquier instante. Un desplazamiento masivo del sistema de reconstrucción 3D generará formas tridimensionales desplazadas. Notando que el objeto posee puntos que no se deforman, es posible reposicionar correctamente la forma tridimensional obtenida en función del tiempo y calcular la deformación de la superficie.

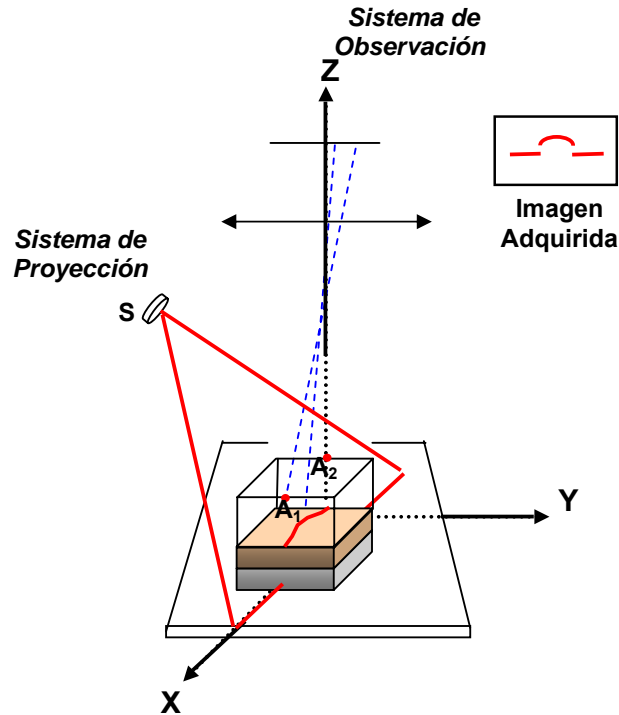


Fig. 6. Reconstrucción 3D del cuerpo basándose en información del cuerpo que no se deforma.

En este capítulo se fijaron las condiciones experimentales exigidas al sistema de medida 3D necesarias para estudiar el fenómeno de diapírismo y el vulcanismo de lodo, a partir de modelos análogos. Se llega a la conclusión que el sistema de medida debe resolver objetos complicados, de baja reflectividad, con posibles discontinuidades en su superficie. Adicionalmente se debe realizar un análisis dinámico de la evolución de la superficie externa del objeto y se debe construir un sistema para medir varios modelos análogos simultáneamente. El desplazamiento del sistema de medida genera inconvenientes en la determinación de la deformación de la superficie en instantes consecutivos, situación que se puede resolver sabiendo si el cuerpo de estudio posee puntos que no se deforman. En el capítulo siguiente se utilizarán las conclusiones obtenidas para diseñar y construir el dispositivo de medida implementado en el desarrollo de este trabajo investigativo.

CAPITULO 2

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el sistema óptico empleado para el análisis dinámico de la superficie externa de un modelo análogo de un volcán de lodo. El sistema óptico se implementó a partir de la técnica de triangulación láser. Generalmente, ésta técnica de reconstrucción consta básicamente de un sistema de iluminación láser, un sistema de observación, un sistema de desplazamiento y un sistema de adquisición, control y tratamiento de imágenes. En esta investigación es necesario utilizar varios sistemas de observación con su respectivo patrón de iluminación, los cuales en conjunto deben desplazarse realizando un barrido sobre el objeto, para obtener una imagen 3D digitalizada.

Se explica el procedimiento de calibración de cámaras, este proceso es necesario para extraer información métrica del mundo 3D a partir de imágenes 2D, determinando parámetros internos (coordenadas del punto principal, distancia focal) y externos (matriz de rotación, vector de translación) de la cámara. Este proceso abre la posibilidad de realizar aplicaciones, tales como reconocimiento, seguimiento y reconstrucción 3D, los cuales se basan en el conocimiento de calibración y posición de la cámara. De igual manera se explica el procedimiento para realizar la reconstrucción 3D digital de cualquier objeto.

2.2. DESCRIPCION DEL SISTEMA

A partir del método de triangulación láser y el método de estereoscopía, mostrado en la figura 7, se diseñó el montaje para calcular la topografía de los volcanes de lodo y permitir el análisis de la evolución temporal de la superficie.

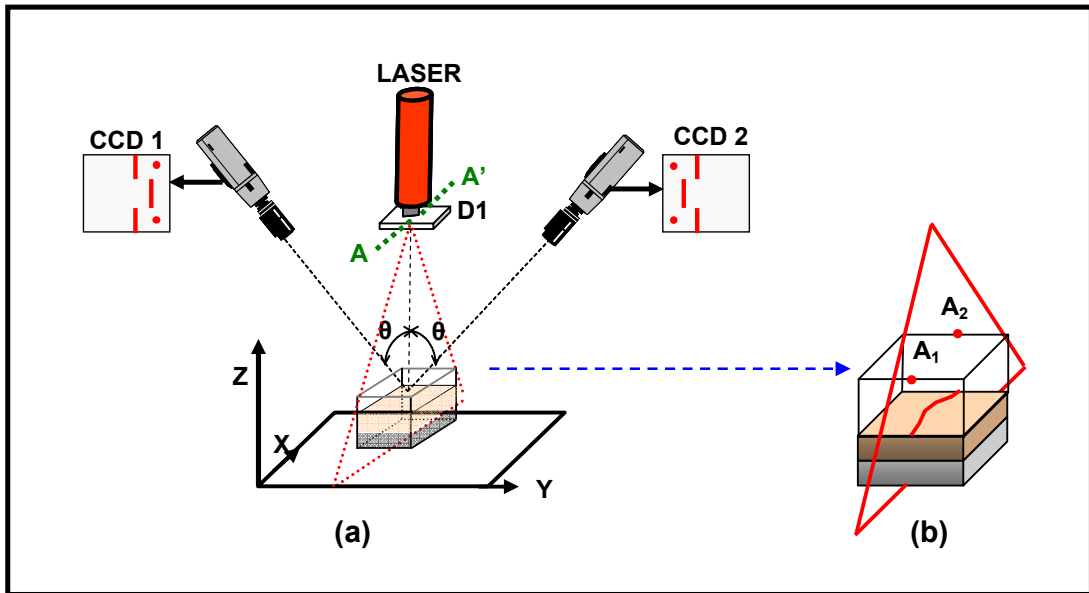


Fig. 7. a) Sistema Óptico de Reconstrucción 3D, b) Detalle del cuerpo.

Este sistema óptico consta principalmente de dos partes: Un sistema de proyección, donde es proyectado un plano láser sobre la superficie del objeto por medio del dispositivo D1. Este dispositivo genera un plano láser que intercepta el plano de referencia ($Z=0$), formando una línea láser paralela al eje X. El dispositivo D1 posee adicionalmente un sistema que rota el plano láser en dirección del eje Y. El eje de rotación del plano láser es paralelo al eje X e indicado en la figura 7(a) como $\overline{AA'}$. Un sistema de observación estereoscópica comprendido por dos cámaras CCD ubicadas en posiciones angulares $\pm\theta$ con respecto al eje de simetría láser, adquiere perspectivas diferentes de la línea láser proyectado sobre el objeto.

Al proyectar el patrón láser sobre una superficie con relieve se observa una deformación de la línea debida a la topografía propia del objeto. Si la superficie del objeto es plana, se obtiene la imagen de una línea recta, si la superficie no es plana la línea láser se deformara debido a la topografía del cuerpo.

Las dos cámaras y el láser forman un dispositivo óptico compacto utilizado para desplazarlo y medir la topografía de diferentes modelos y en diferentes instantes de tiempo. Este dispositivo posee un sistema coordinado (X, Y, Z) que permite reconstruir la sección del cuerpo que observa cada cámara. Al desplazar el dispositivo óptico se desplaza el origen de su sistema coordinado con respecto a la superficie del cuerpo, perdiéndose cualquier variación global de la topografía del cuerpo. La figura 7(b) muestra un esquema de la intercepción entre el plano láser proyectado y el modelo análogo a analizar. Los puntos A_1 y A_2 corresponden a la intercepción del plano láser con los bordes del recipiente. Las coordenadas tridimensionales de estos puntos se calculan utilizando el proceso de estereoscopia. Como estos puntos no se deforman, su posición tridimensional sirve para reposicionar la reconstrucción 3D de la superficie en cualquier instante de tiempo.

Según lo anterior, el procedimiento de adquisición de imágenes para la reconstrucción tridimensional se realiza de la siguiente manera: Ajustando el plano láser a una posición angular no conocida, cada cámara adquiere una perspectiva diferente de la línea de intercepción deformada por la superficie del objeto. Sobre cada imagen se deben identificar los puntos de intercepción A_1 y A_2 que sirven de referencia global para reposicionar la reconstrucción tridimensional que realiza cada cámara. Alterando secuencialmente el ángulo de rotación del plano láser a valores no conocidos, se adquieren las imágenes necesarias para reconstruir la superficie del objeto. Según el método de triangulación láser, conociendo la posición del eje de rotación $\overline{AA'}$ del plano láser, el ángulo de deflexión del plano láser y los parámetros de calibración de la cámara, se pueden calcular las coordenadas tridimensionales de los puntos sobre la línea deformada y digitalizada. Se conoce con precisión la posición

del eje de rotación, y se calculan los parámetros de calibración. Pero es difícil medir el ángulo de deflexión cuando se utiliza un sistema de rotación no calibrado. Para resolver este inconveniente, y debido a que en cada cámara se obtienen los puntos A_1 y A_2 es posible conocer las coordenadas 3D de estos puntos usando el método de visión estereoscópica. A partir de estas coordenadas y de la coordenada del eje de rotación se calcula la ecuación del plano láser en el sistema coordenado de calibración XYZ. Como cada cámara se ha calibrado, se calcula la ecuación de la línea que pasa por cada punto de la línea láser sobre la imagen, ver figura 8.

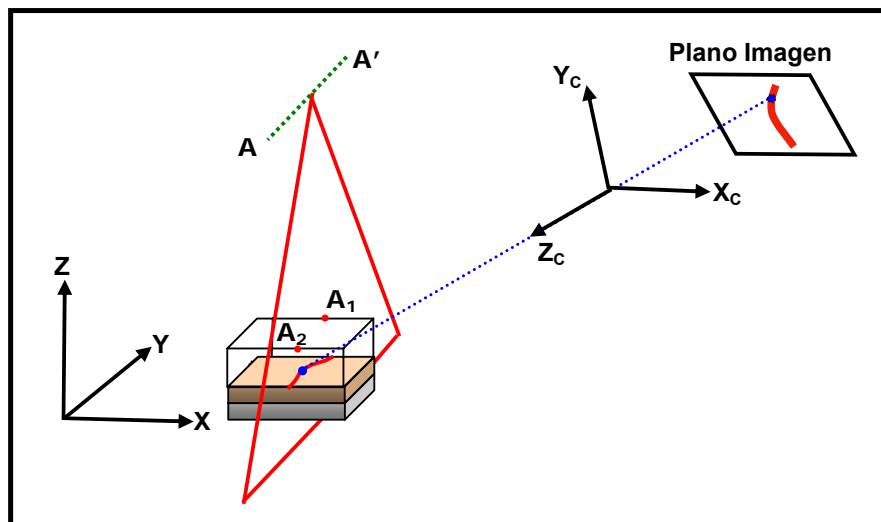


Fig. 8 Geometría del sistema para calcular la ecuación de la línea en el espacio que pasa por cada punto de la línea láser

La intercepción de la línea con el plano láser determinan las coordenadas (X,Y,Z) del punto sobre la superficie del cuerpo. Repitiendo este procedimiento para todos los puntos de la línea láser imagen se calcula la topografía del cuerpo para los puntos del cuerpo que intercepta el plano láser. Repitiendo el anterior procedimiento para las diferentes posiciones angulares del plano láser, se obtiene la reconstrucción 3D de la superficie. El sistema óptico de reconstrucción 3D se utilizó para evaluar 24 modelos análogos en diferentes instantes. De esta manera el dispositivo se desplazó para monitorear los diferentes modelos.

2.2.1. CALIBRACIÓN DE UNA CÁMARA

Como se mencionó en la sección anterior, el procedimiento de reconstrucción 3D se basa principalmente en la utilización de los parámetros de calibración de cada cámara. La idea principal de los procesos de calibración de cámaras, consiste en a partir del modelo de proyección previamente definido que relaciona los sistemas de coordenadas, obtener los parámetros necesarios para convertir un punto en el espacio objeto al punto correspondiente en el espacio imagen y viceversa.

En esencia, el proceso de calibración de cámara consiste en determinar la geometría y características internas de la cámara: parámetros intrínsecos (coordenadas del punto principal, distancia focal, etc.), y los parámetros extrínsecos (rotación y translación), que representan la localización y orientación de la cámara relativa al sistema de coordenadas del objeto. Estos parámetros normalmente son calculados usando un patrón de calibración (figura 9) que contiene rasgos fácilmente detectables de manera precisa en la imagen capturada.

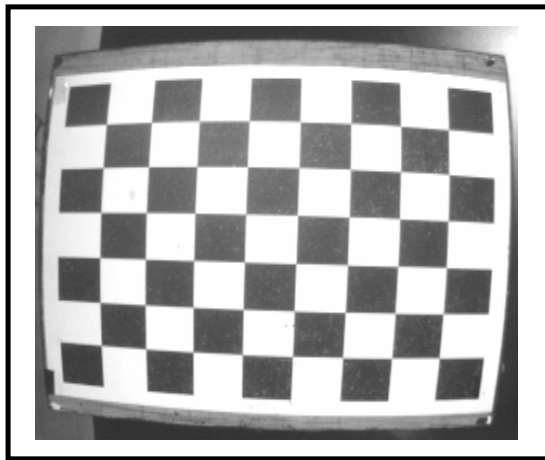


Fig. 9. Cuadrícula utilizada como Patrón de Calibración.

La figura 10 muestra el modelo de proyección puntual y los sistemas coordenados utilizados para modelar los sistemas formadores de imágenes utilizados. En este modelo la información del objeto se proyecta en el plano imagen por una línea a través de un centro de proyección O_c , denominado

centro óptico. El plano imagen se encuentra situado a una distancia llamada Distancia Focal f del centro óptico. El eje óptico es la línea perpendicular al plano imagen y pasa por el centro óptico.

Para ubicar objetos en el mundo real, se define un sistema de referencia fijo, que es llamado sistema de referencia del objeto, (X_w, Y_w, Z_w) . Un objeto en una imagen es medido en términos de coordenadas en píxeles, los cuales están en el sistema de referencia de la cámara (X_c, Y_c, Z_c) , donde el eje Z_c define al eje óptico. Con sólo conocer la distancia en píxeles entre puntos en una imagen, no es posible determinar la distancia correspondiente a los mismos puntos en el mundo real. Por lo tanto, es necesario establecer las ecuaciones que relacionen el sistema de referencia del objeto con el sistema de referencia de la cámara, para establecer la relación entre las coordenadas de los puntos en el espacio 3D y las coordenadas de los puntos en de imagen 2D. Esta relación, no se puede establecer directamente, haciéndose necesario establecer un sistema de referencia intermedio, llamado sistema de referencia de la imagen. El sistema coordenado (U, V) define las filas y columnas en píxeles en el plano imagen y son paralelos a los ejes X_c y Y_c respectivamente. El plano imagen se encuentra a una distancia focal f del origen O_c . Este plano es perpendicular al eje Z_c e intercepta el punto principal de coordenadas (u_o, v_o) en píxeles del plano imagen. El sistema de referencia en milímetros sobre el plano imagen es (X_u, Y_u) paralelos a los ejes X_c, Y_c y centrados en (u_o, v_o) , como se indica en la figura 10.

Usando la perspectiva puntual, (modelo pinhole), un punto $P_o (X_w, Y_w, Z_w)$ en el espacio objeto, es proyectado al punto P_i de coordenadas (X_u, Y_v) . Las coordenadas del punto P_o en el sistema de referencia de la cámara son (X_c, Y_c, Z_c) , a partir de la proyección lineal se tiene:

$$X_u = \frac{f}{Z_c} X_c \quad ; \quad Y_v = \frac{f}{Z_c} Y_c \quad (2)$$

Las coordenadas (u,v) en píxeles se calculan utilizando los factores de conversión K_x y K_y en píxel/mm y las coordenadas del punto principal (u_o, v_o) en píxeles .

$$u = K_u X_u + u_o \quad ; \quad v = K_v Y_v + v_o \quad (3)$$

De igual manera, las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) de un punto P_o en la superficie del objeto y con coordenadas $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ en el sistema coordenado de la cámara están relacionados de acuerdo de acuerdo a la ecuacion:

$$\vec{P}_c = \mathbf{R} * \vec{P}_o + \vec{T} \quad (4)$$

Donde \mathbf{R} es la matriz de Rotación entre sistemas de referencia y \mathbf{T} es el vector de Translación.

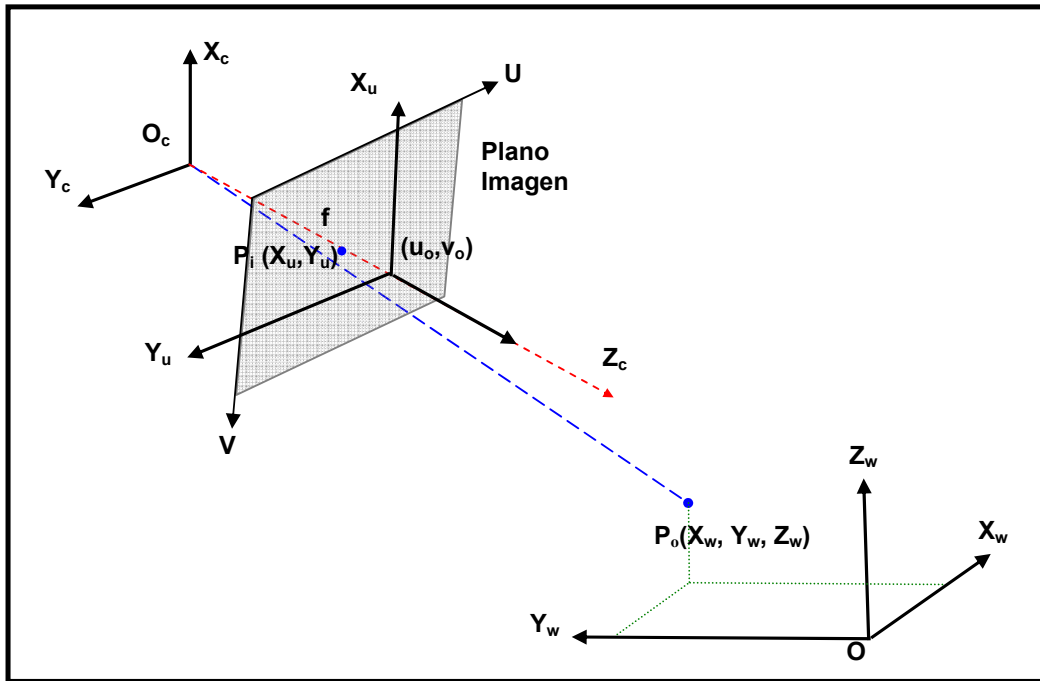


Fig. 10. Sistemas coordenados utilizados para calibrar las cámaras.

2.2.1.1. Modelos de cámara con distorsiones geométricas.

Si los componentes ópticos de la cámara fueran perfectos, la transformación entre la imagen bidimensional y el objeto tridimensional en el espacio sería perfectamente lineal y fácil de resolver. Pero las lentes producen distorsiones

que no son lineales y que afectan la precisión de la transformación. Estas distorsiones se refieren a las posiciones de los puntos que forman la imagen alejados de la posición ideal según el modelo de proyección puntual. Como un resultado de algunos tipos de imperfecciones existentes en las lentes, la expresión (3) no permanece constante y debe ser remplazada por expresiones que tomen en cuenta explícitamente los errores en la posición introducida por estos. La cantidad de error δ_i en la posición (X_u, Y_v) a lo largo de cada coordenada, usualmente depende de la posición del punto:

$$X_u' = X_u + \delta_x \quad ; \quad Y_v' = Y_v + \delta_y \quad (5)$$

Las coordenadas (X_u', Y_v') son las correspondientes coordenadas con distorsión, es necesario corregir las imágenes con distorsiones para obtener valores reales del objeto. Las distorsiones mas comunes encontradas experimentalmente son la distorsión radial que genera los tradicionales defectos en cojín y barrilete y la distorsión descentral. Otros tipos de distorsiones se han propuesto en literatura [4], en la mayoría de los casos la influencia de estos errores son pequeños [5]. En este trabajo la utilización de las primeras aproximaciones de la modelación de la distorsión radial y descentral son utilizadas, debido a la evidente distorsión, como se observa en la figura 9.

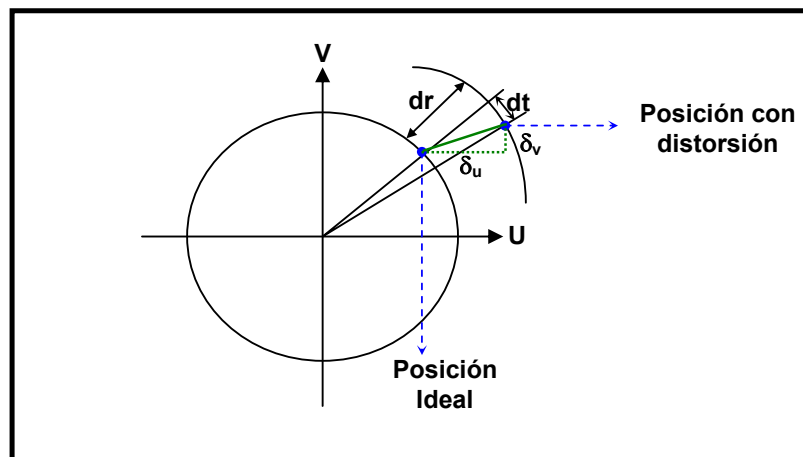


Fig. 11. Distorsión radial y tangencial

2.2.1.1.1. Distorsión Radial

La distorsión radial causa un desplazamiento hacia adentro o hacia fuera a lo largo del radio. Este tipo de distorsión es causado principalmente por defectos en el radio de curvatura de las lentes. La cantidad de distorsión radial de una lente perfectamente centrada a lo largo de cada coordenada cartesiana de la imagen puede ser representada por:

$$\begin{aligned}\delta_x^r &= k_1 X_u (X_u^2 + Y_v^2) + k_2 X_u (X_u^2 + Y_v^2)^2 + O[(X_u, Y_v)^7] \\ \delta_y^r &= k_1 Y_v (X_u^2 + Y_v^2) + k_2 Y_v (X_u^2 + Y_v^2)^2 + O[(X_u, Y_v)^7]\end{aligned}\quad (6)$$

Donde k_1 , k_2 son constantes que determinan la cantidad y dirección de la distorsión.

2.2.1.1.2. Distorsión Descentral

Es provocada por la falta de colinealidad de los centros ópticos y produce desplazamientos radiales y tangenciales. La componente tangencial puede ser modelada por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\delta_x^d &= P_2(3X_u^2 + Y_v^2) + 2P_1 X_u Y_v + O[(X_u, Y_v)^4] \\ \delta_y^d &= 2P_2 X_u Y_v + P_1(X_u^2 + 3Y_v^2) + O[(X_u, Y_v)^4]\end{aligned}\quad (7)$$

Donde P_1 y P_2 son constantes que determinan la cantidad y dirección de la distorsión, así como el eje de máxima distorsión tangencial.

2.2.2. NOTACION MATRICIAL

Según lo anterior, un modelo de cámara más apropiado para aproximar la calibración puede ser derivado combinando el modelo pinhole con la modelizada de las distorsiones radial y descentral de acuerdo a:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_u(X_u + \delta_x^r + \delta_x^d) \\ K_v(Y_v + \delta_y^r + \delta_y^d) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

En este modelo, el conjunto de parámetros intrínsecos es alterado por los coeficientes de distorsión. Según las anteriores ecuaciones cuatro coeficientes son utilizados para calcular los valores de distorsión radial y tangencial introducida por la distorsión.

Desde un punto de vista geométrico, la imagen obtenida con las cámaras es el resultado de una transformación geométrica. Esta transformación permite pasar de una representación tridimensional de la escena a una representación bidimensional de la misma. Para pasar de coordenadas definidas en el sistema coordenado del objeto a coordenadas de la imagen expresadas en píxeles, son necesarios tres pasos:

1. Transformación tridimensional: Los puntos tridimensionales expresados en el sistema coordenado del objeto experimentan un cambio al pasar al sistema coordenado de la cámara. Este cambio de sistema coordenado comprende 9 parámetros: 6 para las rotaciones (r) y 3 para las translaciones (t). Estos parámetros son la posición y la orientación de la cámara, y son llamados parámetros extrínsecos. La ecuación (4) puede ser escrita de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2. Proyección 3D-2D: Después del cambio de sistema coordenado, los puntos tridimensionales expresados en el sistema coordenado de la cámara son proyectados sobre el plano de la imagen, según la ecuación (2). Esta ecuación puede escribirse matricialmente usando coordenadas homogéneas como:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

3. Cambio de coordenadas: Para pasar a coordenadas expresadas en píxeles, las coordenadas se someten a una transformación análoga del plano, definida en la ecuación (3), para un sistema libre de aberraciones o la ecuación (8), para un sistema con aberraciones. Esta transformación, está compuesta de 4 parámetros llamados parámetros intrínsecos. La ecuación de conversión (3) puede escribirse usando notación matricial como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u \\ Y_v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Y la ecuación de conversión (8) puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u + \delta_x \\ Y_v + \delta_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Agrupando ecuaciones para el sistema libre de aberraciones, se tiene:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

donde,

$$M = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (14)$$

En las ecuaciones anteriores $f_u = f * K_u$ y $f_v = f * K_v$, proporcionan la distancia focal en unidades de píxeles a lo largo de los ejes u y v respectivamente, y (u_0, v_0) es el punto principal de la imagen [6]. La matriz \mathbf{M} es conocida como matriz de proyección. Para el caso de aberraciones:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 + \delta_u \\ 0 & k_v & v_0 + \delta_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

donde $\delta_u = k_u \delta_x$ y $\delta_v = k_v \delta_y$

2.2.2.1. Transformación Lineal Directa (DLT)

La matriz de proyección \mathbf{M} establece la relación matricial entre las coordenadas del objeto, medidas en unidades del sistema métrico y las coordenadas de la cámara, medidas en píxeles. Esta matriz puede escribirse como:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 & m_{14} \\ \bar{m}_2 & m_{24} \\ \bar{m}_3 & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde \bar{m}_j es un vector fila obtenido de las tres primeras columnas. Así, $\bar{m}_j = [m_{j1} \ m_{j2} \ m_{j3}]$ con $j = 1, 2, 3$. Los valores de cada elemento de m_{ij} se pueden obtener de la definición de \mathbf{M} . Utilizando la ecuación (13) donde \mathbf{M} se ha definido para el sistema libre de aberración, se puede escribir las coordenadas de la imagen de un punto de la escena de la siguiente forma:

$$u = \frac{m_{11}X_w + m_{12}Y_w + m_{13}Z_w + m_{14}}{m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34}} \quad (17)$$

$$v = \frac{m_{21}X_w + m_{22}Y_w + m_{23}Z_w + m_{24}}{m_{31}X_w + m_{32}Y_w + m_{33}Z_w + m_{34}} \quad (18)$$

Con el fin de calcular los coeficientes de la matriz \mathbf{M} , es necesario escribir un sistema de ecuaciones a partir de los puntos del objeto y su proyección en la imagen. Cada punto (X_w, Y_w, Z_w) se proyecta en (u_i, v_i) generándose dos ecuaciones. Estas ecuaciones son lineales con respecto a los coeficientes de la matriz. De esta forma se necesitan al menos 6 puntos para determinar los 12 coeficientes de la matriz \mathbf{M} que nos interesa. Es decir, las ecuaciones (17) y (18) pueden ser rescritas como una combinación lineal de los parámetros m_{ij} :

$$X_w m_{11} + Y_w m_{12} + Z_w m_{13} + m_{14} - u_i X_w m_{31} - u_i Y_w m_{32} - u_i Z_w m_{33} = u_i m_{34} \quad (19)$$

$$X_w m_{21} + Y_w m_{22} + Z_w m_{23} + m_{24} - v_i X_w m_{31} - v_i Y_w m_{32} - v_i Z_w m_{33} = v_i m_{34} \quad (20)$$

Al ubicar una cuadrícula en el espacio objeto donde se conocen las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) de varios puntos y al definir sobre la cuadrícula las coordenadas en píxeles (u_i, v_i) correspondientes, se obtiene un sistema lineal de ecuaciones de la forma (19) y (20). Si se utilizan N puntos se obtienen $2N$ ecuaciones. Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen las componentes m_{ij} de la matriz de proyección para el sistema libre de aberración. Este procedimiento de transformación final es llamado transformación lineal directa (DLT).

2.2.2.2. Cálculo de Parámetros Intrínsecos y Extrínsecos

A partir de los 12 elementos calculados de la matriz \mathbf{M} se pueden obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de calibración. La matriz de rotación \mathbf{R} se define como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{r}_1 \\ \bar{r}_2 \\ \bar{r}_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Sabiendo que $\bar{r}_i * \bar{r}_j^T = \delta_{ij}$ y a partir de la definición de \mathbf{M} se obtiene:

- *Coordenadas del punto principal:*

$$\begin{aligned} u_o &= \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_3^T \\ v_o &= \bar{m}_2 \cdot \bar{m}_3^T \end{aligned} \quad (22)$$

- *Distancias focales en x , y:*

$$\begin{aligned} f_u^2 &= \bar{m}_1 \cdot \bar{m}_1^T - [\bar{m}_1 \cdot \bar{m}_3^T] \\ f_v^2 &= \bar{m}_2 \cdot \bar{m}_2^T - [\bar{m}_2 \cdot \bar{m}_3^T] \end{aligned} \quad (23)$$

- *Matriz de rotación:*

$$\begin{aligned} \bar{r}_1 &= \frac{\bar{m}_1 - u_o \bar{r}_3}{f_u} \\ \bar{r}_2 &= \frac{\bar{m}_2 - v_o \bar{r}_3}{f_v} \\ \bar{r}_3 &= \bar{m}_3 \end{aligned} \quad (24)$$

- *Vector de translación:*

$$\begin{aligned} t_x &= \frac{m_{14} - u_o t_z}{f_u} \\ t_y &= \frac{m_{24} - v_o t_z}{f_v} \\ t_z &= m_{34} \end{aligned} \quad (25)$$

El anterior procedimiento permite calcular los parámetros de calibración de cada cámara asumiendo que la distorsión es cero. En situaciones experimentales como la mostrada en la figura 9 el sistema formador de imagen posee aberraciones debido a los términos exponenciales diferentes de 1 en la ecuación (6). El sistema de ecuaciones que relacionan (u'_i, v'_i) y (X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}) para cada punto no es lineal y el proceso de solución para calcular los valores de m_{ij} se convierte en un proceso de optimización no lineal. La función error utilizada para estimar los parámetros de calibración se define en la ecuación (26), donde N es el numero de puntos de observación, (u, v) son las

coordenadas teóricas en píxeles obtenidas en una etapa intermedia y (u_i, v_i) son las coordenadas experimentales.

$$F = \sum_{i=1}^N (U'_i - U_i)^2 + (V'_i - V_i)^2 \quad (26)$$

Usando algoritmos de optimización es posible resolver el sistema de ecuaciones no lineales. El método de optimización de Levenberg-Marquardt proporciona una rápida convergencia. Sin embargo, sin unos valores iniciales apropiados de los parámetros, la optimización puede caer en un mínimo local y causar que la calibración falle. Este problema se puede resolver usando como valores iniciales, los parámetros obtenidos de la DLT para la optimización.

2.3. CALIBRACIÓN DE LAS CÁMARAS UTILIZADAS

En el sistema de reconstrucción, se utilizaron dos cámaras convencionales con las siguientes características dadas por el fabricante:

| Cámara CCD | Objetivo (mm) | Numero de Sensores |
|------------|---------------|--------------------|
| 1 | 3.6 | 640X480 |
| 2 | 3.6 | 640X480 |

Tabla. 2. Características de las cámaras utilizadas.

Las cámaras utilizadas, presentan una fuerte distorsión como se observa en la figura 9. Ambas presentan principalmente una fuerte distorsión radial, lo que implicó realizar un proceso de calibración antes de trabajar con las imágenes. Para realizar la calibración de las cámaras y extraer parámetros intrínsecos y extrínsecos, se utilizó el procedimiento descrito anteriormente y propuesto por Janne Heikkila [5]. “Camera calibration toolbox” es un software de calibración de cámaras digitales escrito para MATLAB y de libre acceso en Internet, que permite calibrar cualquier sistema de adquisición de imágenes. Esta basado en el procedimiento anterior y posee un interfaz grafica amigable al usuario que permite secuencialmente obtener los parámetros de calibración.

A continuación se ilustra los pasos importantes desarrollados por la interfaz para calcular los parámetros. Como objeto de calibración, se utilizó una cuadrícula blanco y negro, mostrada en la figura 9, cuyo tamaño de cuadro es de 28 mm.

El proceso de calibración tiene las siguientes etapas:

1. **Adquisición de imágenes:** En esta etapa del proceso, se adquirieron 24 imágenes de la cuadrícula por cada cámara, en diferentes perspectivas de la escena que sirvió para establecer los puntos de control para la calibración de las cámaras.
2. **Extracción de los puntos de control:** El primer punto seleccionado para realizar dicha extracción, es asociado con el punto origen de la imagen de referencia de la cuadrícula. Los otros tres puntos de la cuadrícula pueden seleccionarse aleatoriamente. Una vez realizada esta operación se establece el sistema coordenado que define la dirección de los ejes X, Y y Z, como lo muestra la figura 12. Para extraer los puntos de control, se hace necesario conocer la cantidad de cuadros al interior del marco seleccionado tanto en la dirección X como en Y, y conocer el tamaño del cuadro. De esta manera se pueden calcular las coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) en mm contando el número de cuadros y asociarlos a los puntos (u_i, v_i) calculados digitalmente.

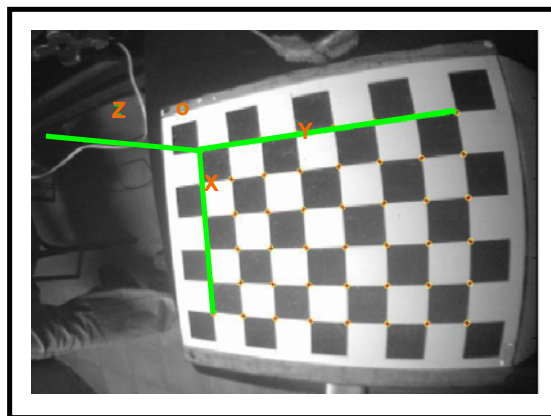


Fig. 12. Sistema coordenado de la cámara

La figura 13 (a) muestra los puntos de control en forma de cruz como deberían verse en una imagen libre de distorsiones. Debido a las distorsiones encontradas en las imágenes adquiridas, las esquinas preestablecidas libre de aberraciones no son cercanas a las esquinas de la imagen real. Esto podría generar inconvenientes en el proceso de optimización al elegir valores iniciales de los parámetros. El software permite introducir un valor inicial a la distorsión radial para aproximar de mejor manera los valores iniciales.

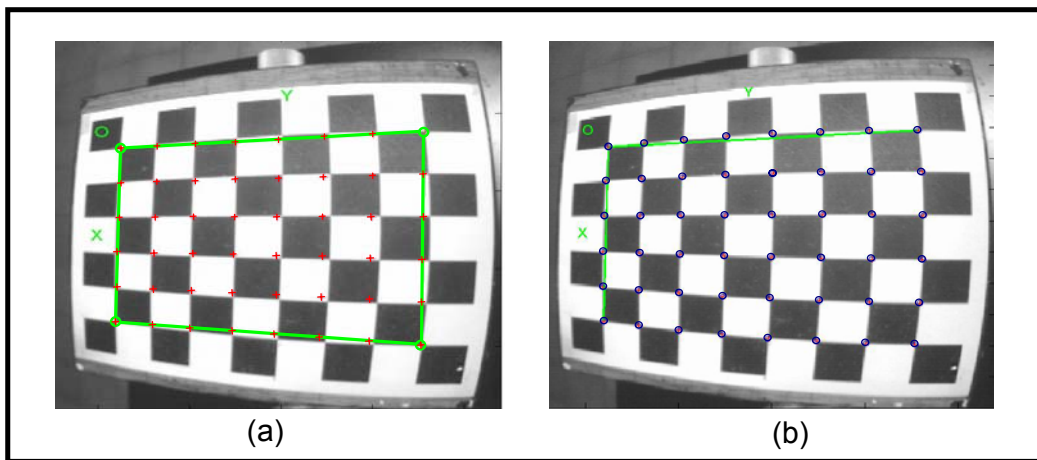


Fig.13. Extracción de puntos de control de la imagen (a) Puntos de Control para imagen libre de distorsiones, (b) Puntos Retroproyectados

La figura 13 (b), muestra una retroproyección luego de aplicar el coeficiente de distorsión radial al utilizar los parámetros obtenidos de la transformación lineal; ambas imágenes corresponden a parámetros de la cámara 1, resultados similares se obtuvieron para la cámara 2.

Una vez extraídas las esquinas de cada una de las imágenes, se obtienen los datos para iniciar el proceso de optimización. El algoritmo de optimización usa los valores establecidos por la transformación lineal directa y el valor de coeficiente de distorsión radial que acerca los puntos de control a las esquinas en la imagen real, definido anteriormente. Internamente el procedimiento de optimización utiliza la función de error definida en la ecuación (26) para determinar el valor de los parámetros de calibración que minimiza el error. El algoritmo de optimización converge hasta minimizar el error cuadrático. Como

resultado de estos procesos de optimización se obtuvieron los siguientes parámetros:

- **Parámetros Intrínsecos Cámara CCD 1 y2**

La tabla 3 muestra los valores obtenidos del procedo de calibración para las cámaras utilizadas.

| Parámetro | CCD 1 | CCD 2 | Parámetro | CCD 1 | CCD 2 |
|---------------|--------|--------|---------------|---------|---------|
| f_u (píxel) | 486.76 | 499.20 | k_1 (píxel) | -0.3844 | -0.3964 |
| f_v (píxel) | 243.65 | 248.53 | k_2 (píxel) | 0.1214 | 0.1729 |
| u_o (píxel) | 260.27 | 325.18 | p_1 (píxel) | -0.0024 | -0.0015 |
| v_o (píxel) | 123.88 | 126.35 | p_2 (píxel) | 0.0092 | 0.0048 |

Tabla. 3. Parámetros Intrínsecos cámaras 1 y 2

- **Parámetros Extrínsecos Cámara CCD 1 y 2**

Los parámetros extrínsecos son calculados con respecto al sistema coordenado O(XYZ) y definidos por:

Cámara CCD 1:

$$R = \begin{bmatrix} 0.0783 & 0.7980 & -0.597 \\ 0.9953 & -0.028 & 0.092 \\ 0.0567 & -0.602 & -0.796 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} -6.44 \\ -54.88 \\ 328.52 \end{bmatrix}$$

Cámara CCD 2:

$$R = \begin{bmatrix} 0.0197 & -0.843 & -0.537 \\ -0.998 & 0.014 & -0.058 \\ 0.0573 & 0.537 & -0.841 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 116.44 \\ 53.14 \\ 227.18 \end{bmatrix}$$

Donde **R** es la matriz de rotación y **T** es el vector de translación del sistema coordenado $O_c(X_c, Y_c, Z_c)$ de cada cámara al sistema coordenado O(XYZ). El sistema de deflexión del plano láser se ubico en las coordenadas O(-5,84,217) en milímetros.

2.4. ANÁLISIS DE ERROR EN EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Con el fin de verificar inicialmente la precisión en el cálculo de los parámetros, se obtiene el error promedio que se comete en calcular las coordenadas (x,y) para los puntos de control del patrón de calibración utilizado en $z=0$. Es decir, las coordenadas en mm de los puntos de control ubicados en $z=0$ se conocen teóricamente y se calculan sus correspondientes coordenada en píxeles (u',v') con distorsión. Se pretende hacer el proceso inverso de proyección para obtener las coordenadas en mm a partir de (u', v') usando los parámetros de calibración, la diferencia entre estas coordenadas define el error que se comete al ubicar un punto en el plano a $Z=0$.

El primer paso a seguir para la estimación de las coordenadas X, Y para un $Z=0$, usando el patrón de calibración (figura 14(a)), es obtener sus coordenadas distorsionadas (u',v') . La figura 14 muestra el tratamiento digital realizado de la imagen. Como hay un contraste apreciable entre los rectángulos del patrón, se extrae el gradiente de la imagen y se binariza. El umbral de binarización se escoge de tal manera que se obtienen las líneas de transición entre los rectángulos, (figura 14 (b)).

Para obtener las intersecciones entre las líneas se correlaciona una sección que contiene un cruce, (recuadro verde, imagen 14(b)), con la imagen binarizada; de esta forma, en cada región de la imagen donde exista un cruce se obtendrá un pico de correlación ver figura 14 (c).

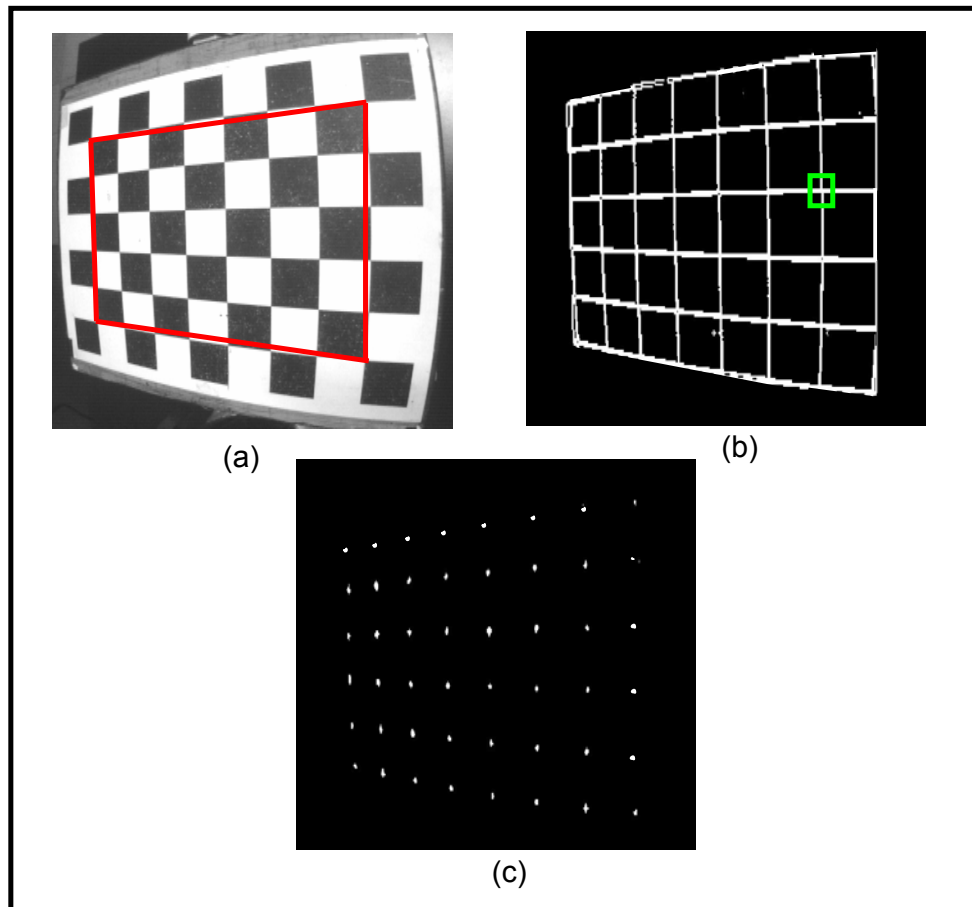


Fig.14. Cálculo de las coordenadas de los puntos en la imagen. (a) Imagen a $Z=0$ utilizada para extraer las coordenadas X, Y ; el cuadro rojo encierra el área de trabajo, (b) Detección de las líneas horizontales y verticales por el método del gradiente, (c) Picos de correlación.

Una vez se han encontrado estos picos se determina la coordenada (u',v') del centro geométrico de éstos. En el modelo de proyección puntual utilizado, el punto sobre la imagen en píxeles pasa por el centro óptico y llega hasta el punto sobre el objeto. Es decir, la línea recta que une estos puntos se puede calcular siempre que se obtengan las coordenadas en píxeles del punto sin aberraciones. Estas coordenadas corregidas (u,v) se obtienen al restarle a (u',v') las distorsiones geométricas como se muestra en la figura 15.

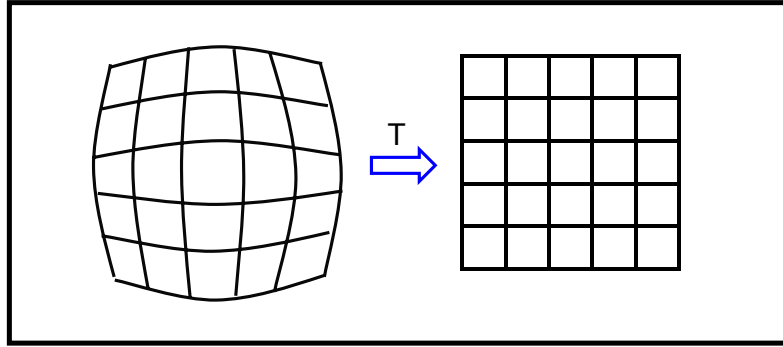


Fig.15. Transformación Geométrica que relaciona píxeles distorsionados a no distorsionados

Las distorsiones geométricas definidas por las ecuaciones (6) y (7) generan un inconveniente al calcularlas. δ_x y δ_y y sus correspondientes en píxeles δ_u y δ_v fueron definidos en función de las coordenadas (X_u, Y_v) de los puntos libres de distorsión, pero sobre la imagen se tiene acceso únicamente a la coordenada (u',v') con aberraciones. Por lo tanto no es posible calcular δ_x y δ_y , se necesita relacionar δ_x y δ_y con (X'_u, Y'_v) a través de cuatro coeficientes k_1', k_2' y P_1', P_2' , de manera similar a como se relaciona en (X_u, Y_v) en las ecuaciones (6) y (7).

$$\begin{aligned}\delta_x^r &= k_1' X'_u (X'^2_u + Y'^2_v) + k_2' X'_u (X'^2_u + Y'^2_v)^2 + \mathcal{O}[(X'_u, Y'_v)^7] \\ \delta_y^r &= k_1' Y'_v (X'^2_u + Y'^2_v) + k_2' Y'_v (X'^2_u + Y'^2_v)^2 + \mathcal{O}[(X'_u, Y'_v)^7]\end{aligned}\quad (27)$$

$$\begin{aligned}\delta_x^d &= P_2' (3X'^2_u + Y'^2_v) + 2P_1' X'_u Y'_v + \mathcal{O}[(X'_u, Y'_v)^4] \\ \delta_y^d &= 2P_2' X'_u Y'_v + P_1' (X'^2_u + 3Y'^2_v) + \mathcal{O}[(X'_u, Y'_v)^4]\end{aligned}\quad (28)$$

El cálculo de estos coeficientes conduce a un sistema lineal de ecuaciones y se ilustra en la figura 16. Se define una matriz de puntos (X_u, Y_v) teóricos equidistantes a partir de k_1, k_2 y P_1, P_2 y de las ecuaciones (6) y (7) se calculan los (X'_u, Y'_v) correspondientes. Usando las ecuaciones (27) y (28) se obtiene una relación lineal entre los coeficientes k_1', k_2' y P_1', P_2' puesto que los otros términos se conocen. Al resolver el sistema de ecuaciones se obtienen k_1', k_2' y P_1', P_2' . De esta manera se calcula δ_x y δ_y en función de (X'_u, Y'_v) .

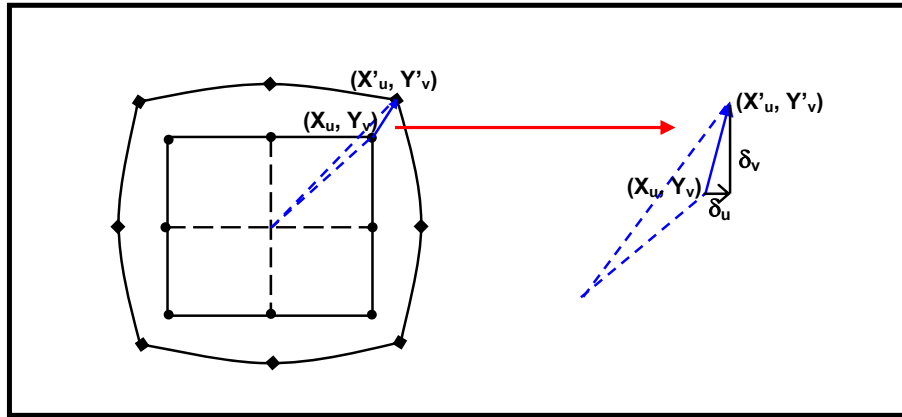


Fig.16. Relación de píxeles distorsionados a no distorsionados

A partir de las coordenadas en píxeles se encuentran sus correspondientes coordenadas en milímetros (X_u, Y_v) , usando los parámetros intrínsecos obtenidos. Con estos puntos y con la coordenada $O_c(0,0,0)$ se calcula la ecuación de la recta $\overline{O_cP}$ en el sistema coordenado de la cámara. Figura 17.

Las coordenadas de P se obtienen de la intersección de la línea $\overline{O_cP}$ con el plano ubicado en $Z_w=0$. La ecuación del plano se calcula con la normal, que es el eje Z_w , y un punto del plano que podría ser el origen O del sistema coordenado del objeto. Esta coordenada debe ser calculada en el sistema coordenado de la cámara para la calcular la coordenada de P como (X_c, Y_c, Z_c) . Usando los parámetros extrínsecos, se calculan las coordenadas de P (X_w, Y_w, Z_w) en el sistema coordenado del objeto.

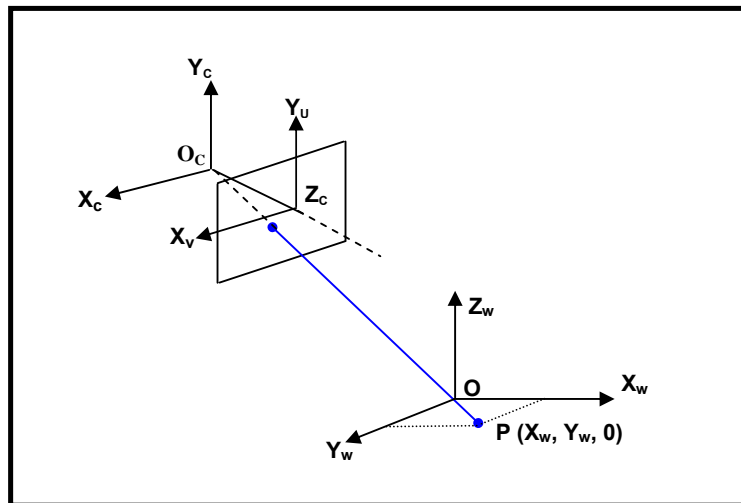


Fig.17. Geometría para determinar las coordenadas de un punto en el espacio objeto

La figura 17 muestra la imagen obtenida por cada cámara, en donde se determinó la posición (X_u, Y_v) de algunos puntos sobre el patrón de calibración para cada cámara individualmente, ubicada a $Z_w = 0$.

Las tablas 4 y 5, muestran los valores reales (VR) y los valores estimados (VE) de las coordenadas (X, Y) para cada uno de los puntos elegidos. Mediante la relación (29) se determina el error como la distancia entre los puntos reales y los puntos estimados.

$$D = \sqrt{(XT - XE)^2 + (YT - YE)^2} \quad (29)$$

Conociendo la distancia entre los puntos, se realizó el cálculo de error para verificar la influencia de los valores obtenidos en el cálculo de los parámetros del sistema

$$\%E = \frac{\bar{D}}{C} \quad (30)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n} \quad (31)$$

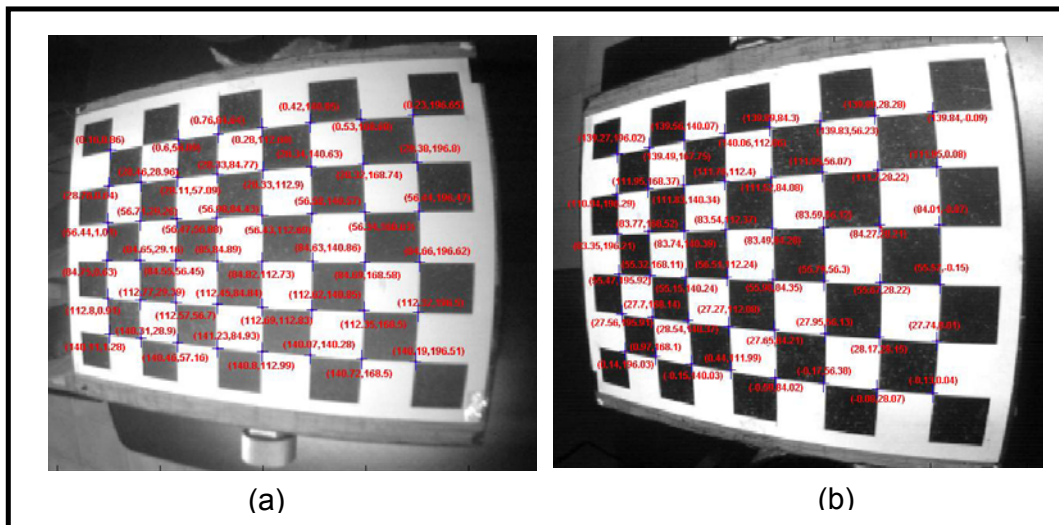


Fig.18. Estimación de coordenadas (X, Y) sobre algunos puntos del patrón de calibración y para cada cámara. (a) CCD1 (b) CCD 2

donde \bar{D} es el valor medio de las distancias halladas mediante la ecuación (34), n es el número de datos y C es el campo de trabajo de la imagen equivalente a 140mm.

2.4.1. Distancia entre VR y VE, y estimación error para la Cámara 1

| Coordenada X (mm) | | Coordenada Y (mm) | | Distancia (mm) |
|-------------------|---------|-------------------|--------|----------------|
| VR (mm) | VE (mm) | VR(mm) | VE(mm) | |
| 84 | 84.75 | 0 | 0.63 | 0.97 |
| 56 | 56.44 | 0 | 1.01 | 1.10 |
| 112 | 112.80 | 0 | 0.91 | 1.21 |
| 28 | 28.76 | 0 | 0.64 | 0.99 |
| 140 | 140.11 | 0 | 1.28 | 1.28 |
| 0 | 0.16 | 0 | 0.86 | 0.87 |
| 84 | 84.65 | 28 | 29.16 | 1.32 |
| 28 | 28.46 | 28 | 28.96 | 1.06 |
| 56 | 56.71 | 28 | 29.26 | 1.44 |
| 112 | 112.77 | 28 | 29.39 | 1.58 |
| 140 | 140.31 | 28 | 28.90 | 0.95 |
| 84 | 84.55 | 56 | 56.45 | 0.71 |
| 56 | 56.47 | 56 | 56.88 | 0.99 |
| 112 | 112.57 | 56 | 56.70 | 0.90 |
| 28 | 28.11 | 56 | 57.09 | 1.09 |
| 140 | 140.46 | 56 | 57.16 | 1.24 |
| 0 | 0.60 | 56 | 56.89 | 1.07 |
| 56 | 56.98 | 84 | 84.43 | 1.07 |
| 112 | 112.45 | 84 | 84.84 | 0.95 |
| 28 | 28.33 | 84 | 84.77 | 0.83 |
| 85 | 85.00 | 84 | 84.89 | 1.33 |
| 0 | 0.76 | 84 | 84.64 | 0.99 |
| 141 | 141.23 | 84 | 84.93 | 1.54 |

| | | | | |
|-----------|--------|-----|--------|-------------|
| 0 | 0.28 | 112 | 112.68 | 0.73 |
| 56 | 56.43 | 112 | 112.69 | 0.81 |
| 28 | 28.33 | 112 | 112.90 | 0.95 |
| 84 | 84.82 | 112 | 112.73 | 1.09 |
| 112 | 112.69 | 112 | 112.83 | 1.07 |
| 140 | 140.80 | 112 | 112.99 | 1.27 |
| 0 | 0.42 | 140 | 140.85 | 0.94 |
| 28 | 28.34 | 140 | 140.63 | 0.71 |
| 140 | 140.07 | 140 | 140.28 | 0.28 |
| 56 | 56.58 | 140 | 140.57 | 0.81 |
| 112 | 112.62 | 140 | 140.85 | 1.05 |
| 84 | 84.63 | 140 | 140.86 | 1.06 |
| 0 | 0.53 | 168 | 168.68 | 0.86 |
| 140 | 140.72 | 168 | 168.50 | 0.87 |
| 28 | 28.32 | 168 | 168.74 | 0.80 |
| 56 | 56.34 | 168 | 168.63 | 0.71 |
| 84 | 84.69 | 168 | 168.58 | 0.90 |
| 112 | 112.35 | 168 | 168.50 | 0.61 |
| 0 | 0.23 | 196 | 196.65 | 0.68 |
| 140 | 140.19 | 196 | 196.51 | 0.54 |
| 28 | 28.38 | 196 | 196.80 | 0.88 |
| 112 | 112.32 | 196 | 196.50 | 0.59 |
| 56 | 56.44 | 196 | 196.47 | 0.64 |
| 84 | 84.66 | 196 | 196.62 | 0.90 |
| %E | | | | 0.69 |

Tabla 4. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD1

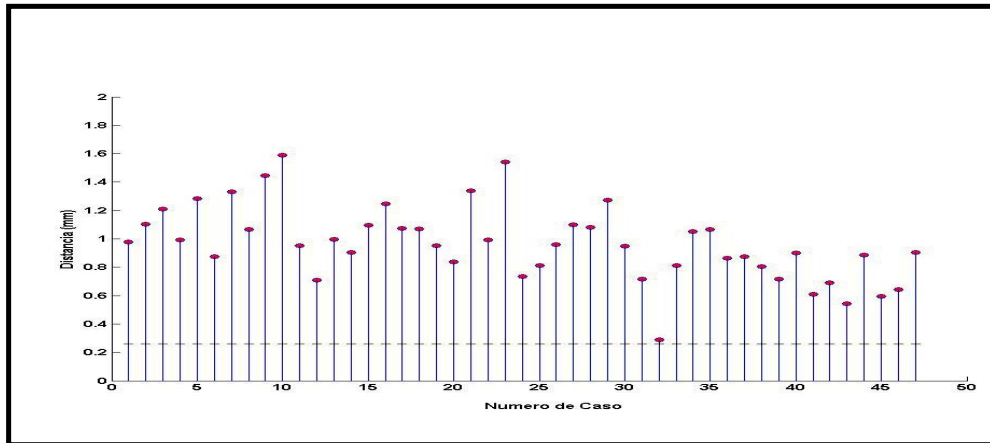


Fig.19. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD1

2.4.2. Distancia entre VR y VE y estimación error para la Cámara 2

| Coordenada X (mm) | | Coordenada Y (mm) | | Distancia (mm) |
|-------------------|---------|-------------------|--------|----------------|
| VR (mm) | VE (mm) | VR(mm) | VE(mm) | |
| 112 | 110.94 | 196 | 196.29 | 1.09 |
| 140 | 139.66 | 196 | 196.02 | 0.73 |
| 84 | 83.35 | 196 | 196.21 | 0.68 |
| 56 | 55.47 | 196 | 195.92 | 0.53 |
| 28 | 27.55 | 196 | 195.91 | 0.45 |
| 0 | 0.14 | 196 | 196.03 | 0.14 |
| 112 | 111.95 | 168 | 168.37 | 0.37 |
| 84 | 83.77 | 168 | 168.51 | 0.56 |
| 140 | 139.49 | 168 | 167.74 | 0.56 |
| 56 | 55.32 | 168 | 168.11 | 0.68 |
| 28 | 27.69 | 168 | 168.13 | 0.33 |
| 0 | 0.97 | 168 | 168.10 | 0.97 |
| 140 | 139.56 | 140 | 140.06 | 0.44 |

| | | | | |
|-----|--------|-----|--------|------|
| 112 | 111.82 | 140 | 140.33 | 0.37 |
| 84 | 83.74 | 140 | 140.39 | 0.47 |
| 56 | 55.14 | 140 | 140.23 | 0.88 |
| 28 | 28.54 | 140 | 140.37 | 0.65 |
| 0 | -0.15 | 140 | 140.02 | 0.15 |
| 140 | 140.05 | 112 | 112.05 | 0.08 |
| 112 | 111.75 | 112 | 112.40 | 0.47 |
| 84 | 83.54 | 112 | 112.37 | 0.59 |
| 56 | 56.51 | 112 | 112.23 | 0.56 |
| 28 | 27.26 | 112 | 112.08 | 0.73 |
| 0 | 0.43 | 112 | 111.99 | 0.43 |
| 140 | 139.88 | 84 | 84.30 | 0.32 |
| 112 | 111.52 | 84 | 84.08 | 0.48 |
| 84 | 83.49 | 84 | 84.28 | 0.58 |
| 56 | 55.97 | 84 | 84.34 | 0.35 |
| 28 | 27.65 | 84 | 84.21 | 0.40 |
| 0 | -0.59 | 84 | 84.01 | 0.59 |
| 140 | 139.82 | 56 | 56.22 | 0.28 |
| 112 | 111.94 | 56 | 56.07 | 0.08 |
| 84 | 83.58 | 56 | 56.12 | 0.42 |
| 56 | 55.78 | 56 | 56.30 | 0.37 |
| 0 | -0.16 | 56 | 56.38 | 0.41 |
| 28 | 27.94 | 56 | 56.12 | 0.13 |
| 140 | 139.89 | 28 | 28.27 | 0.93 |
| 112 | 111.70 | 28 | 28.22 | 0.37 |
| 0 | -0.07 | 28 | 28.07 | 0.10 |
| 28 | 28.16 | 28 | 28.15 | 0.22 |

| | | | | |
|-----------|--------|----|-------|-------------|
| 84 | 84.26 | 28 | 28.20 | 0.33 |
| 56 | 55.66 | 28 | 28.21 | 0.70 |
| 140 | 139.84 | 0 | -0.09 | 0.84 |
| 0 | -0.12 | 0 | 0.04 | 0.13 |
| 112 | 111.95 | 0 | 0.08 | 0.09 |
| 28 | 27.74 | 0 | 0.01 | 0.25 |
| 84 | 84.01 | 0 | -0.06 | 0.06 |
| 56 | 55.56 | 0 | -0.14 | 0.45 |
| %E | | | | 0.33 |

Tabla 5. VR y VE de las coordenadas (X,Y) para cada uno de los puntos elegidos, de la CCD2

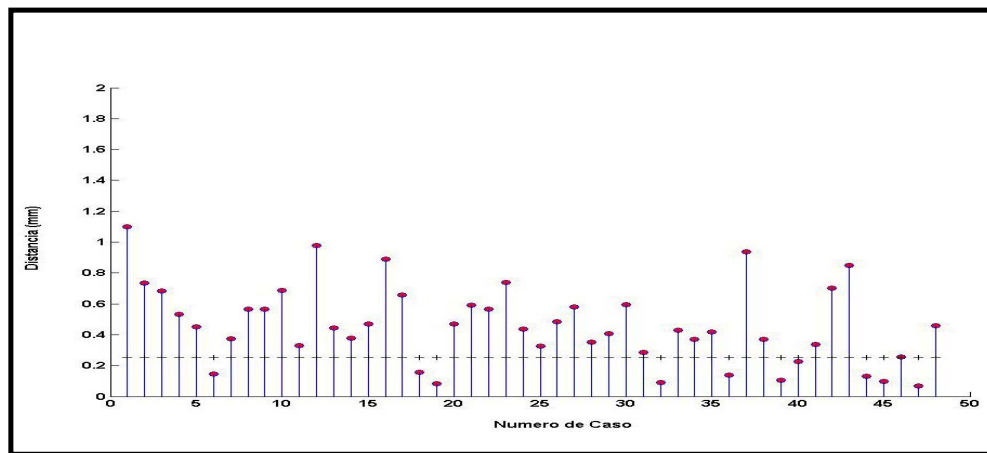


Fig.20. Distribución de distancia entre los VR y VT de la CCD 2

Para la cámara 1 se encuentra un error promedio de 0.69% indica que el sistema reporta un error 0.69 mm ubicar un punto sobre el plano de referencia ubicado en $Z_w=0$ para un campo de observación de 100 mm. Para la cámara 2 el error fue de 0.33%. Este error se puede reducir usando más coeficientes en la modelización de la distorsión radial y tangencial, principalmente.

CAPITULO 3

3.1. INTRODUCCION

En este capítulo se describe la técnica de estereoscopía, necesaria en esta investigación para determinar puntos indeformables de los modelos análogos que sirven para repositonar la reconstrucción tridimensional del volcán de Iodo, obtenida por el método de triangulación láser. Se describe detalladamente el proceso de reconstrucción 3D combinando las técnicas de estereoscopía y triangulación láser. Se calcula la precisión del sistema, comparando las medidas obtenidas por el método óptico y las obtenidas por el método por contacto, utilizando objetos de forma conocida. De igual manera se evalúa el sistema de reconstrucción 3D realizando un análisis temporal de la evolución de la topografía en modelos análogos del fenómeno natural denominado vulcanismo de Iodo.

3.2. VISIÓN ESTÉREO

La estereoscopía es una técnica utilizada para la recuperación de las coordenadas tridimensionales de un número de puntos de una escena, a partir de al menos dos imágenes bidimensionales tomadas desde diferentes perspectivas.

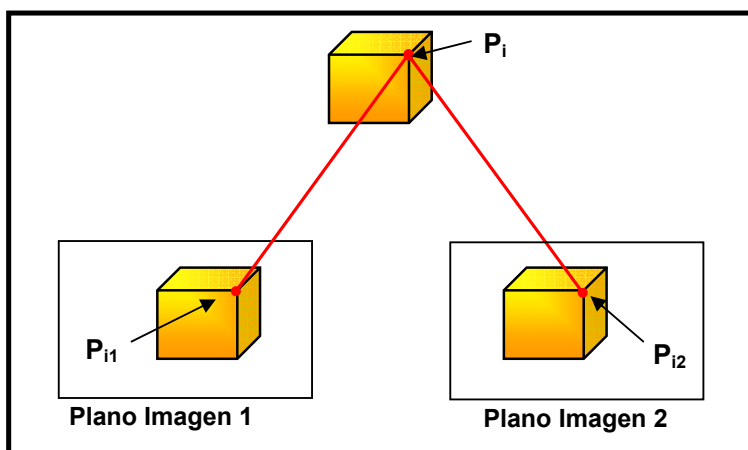


Fig. 21. Imagen del punto P_i , según la perspectiva de cada cámara.

La configuración utilizada se compone de dos cámaras separadas. Debido a la separación entre los ejes focales, cada cámara percibe una proyección distinta de la escena (figura 21). El proceso de la estereoscopia, se centra principalmente en la solución de dos problemas:

1. Encontrar conjuntos de puntos P_{ik} que corresponden a la proyección del punto P_i de las escenas sobre el plano imagen de la cámara k (figura20). La búsqueda del punto P_i en cada una de las imágenes se conoce como el problema de búsqueda de correspondencia.
2. Conocidos los puntos P_{ik} , calcular las coordenadas tridimensionales de los puntos P_i de la escena. Esto hace referencia a la etapa de reconstrucción.

Para la solución de estos problemas, el proceso estereoscópico involucra las siguientes etapas:

- **Calibración**, citada anteriormente, que permite determinar los parámetros intrínsecos (distancia focal, factores de escala, etc.) y extrínsecos (posición y orientación relativa entre las cámaras).
- **Correspondencia**, es la más complicada del proceso. Consiste en establecer el emparejamiento entre los píxeles de la imagen de referencia y encontrar sus correspondientes en la otra imagen.
- **Reconstrucción 3D**, esto es, la obtención de las coordenadas (X, Y, Z) de la escena a partir de los parámetros de calibración.

3.2.1. IMAGEN ESTEREOSCÓPICA

El conjunto de expresiones que relacionan puntos en la escena, expresados en coordenadas globales, con los puntos proyectados expresados en coordenadas locales de cada cámara para una cierta disposición geométrica de los sensores ópticos, se conoce como modelo estereoscópico. Al observar una escena desde dos puntos de vista diferentes, se obtienen imágenes en las cuales los objetos se ven menos o más desplazados según su profundidad y posición en la escena, estas imágenes son conocidas con el nombre de imágenes estereoscópicas.

La imagen estereoscópica implica la obtención de dos imágenes separadas de la misma escena [7]. Existen dos modelos de imagen estereoscópica:

- Los ejes ópticos e_1 y e_2 son paralelos, como muestra la figura 21.

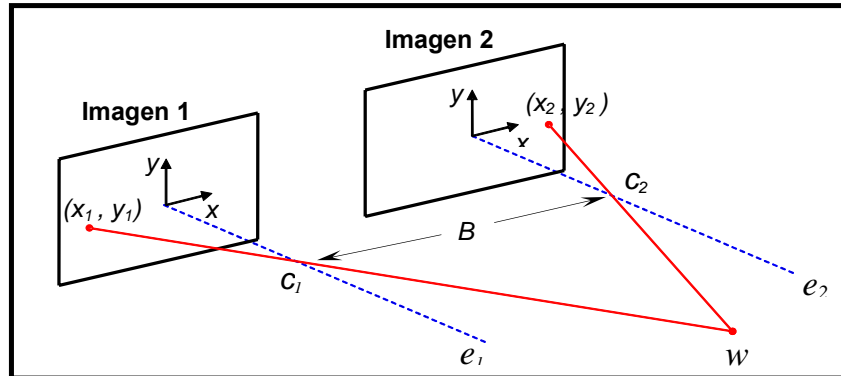


Fig.22. Modelo del proceso de imagen estereoscópica para el caso de ejes ópticos paralelos.

La distancia B entre los centros de las dos lentes se denomina la línea base; e_1 y e_2 son los ejes ópticos de las lentes 1 y 2 respectivamente; c_1 y c_2 son los respectivos centros ópticos.

- Los ejes ópticos e_1 y e_2 convergen, como muestra la figura 23.

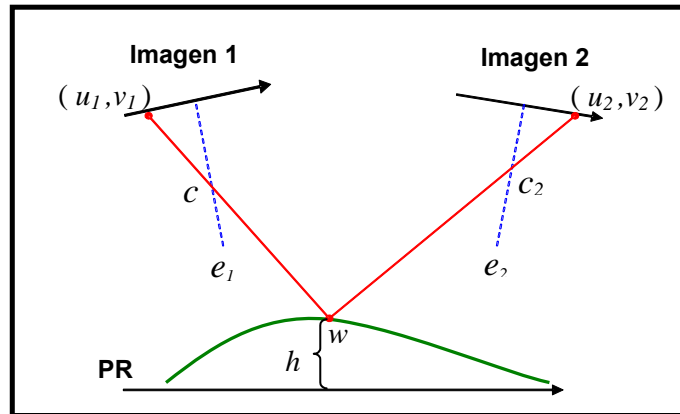


Fig.23. Proceso de imagen estereoscópica para el caso de ejes ópticos convergentes.

La figura 24, es un ejemplo de un par de imágenes estereoscópicas tomadas con un par de cámaras CCD convencionales, cuyas características fueron mostradas en la tabla 2, y que forman parte del sistema óptico construido (figura 7).

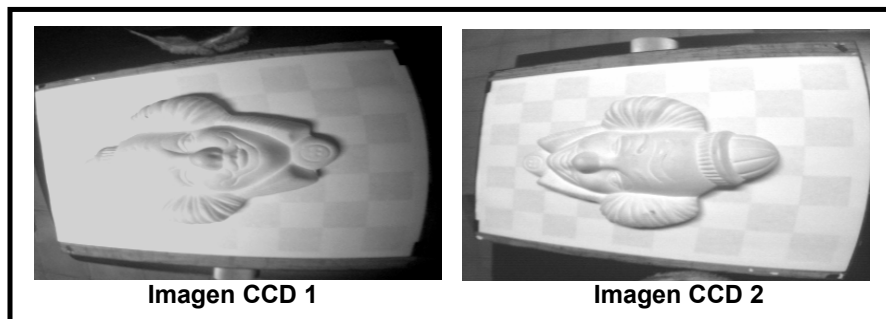


Fig.24. Par de imágenes estereoscópicas registradas por las cámaras CCD utilizadas.

La modelación estereoscópica que se utilizó en esta investigación, se describe en la figura 23. Tradicionalmente, el objetivo fundamental de este sistema es obtener un mapa de profundidad, consistente en un arreglo bidimensional de píxeles que codifican la profundidad de la escena. Es decir, la idea se centra en hallar las coordenadas (X, Y, Z) de un punto w sobre la superficie del objeto, que tiene las coordenadas (u_1, v_1) y (u_2, v_2) en las respectivas imágenes. En esta investigación se utilizó el proceso de estereoscopía para

hallar las coordenadas tridimensionales de puntos del objeto de estudio que no se deformen en función del tiempo, de esta manera, la posición tridimensional de estos puntos sirve para repositonar la reconstrucción 3D de la superficie en cualquier instante de tiempo.

3.3. PROCESO DE RECONSTRUCCION 3D

A continuación se muestra el proceso de reconstrucción utilizado para calcular la topografía de los volcanes de lodo, partiendo del montaje óptico diseñado y mostrado en la figura 7.

3.3.1. Imágenes Adquiridas

El procedimiento de adquisición de imágenes para la reconstrucción tridimensional se realiza a partir de monitoreos periódicos con el fin de evaluar la evolución de la topografía del volcán de lodo. Se realiza el barrido del plano láser a una posición angular no conocida, cada cámara adquiere una perspectiva diferente de la línea de intercepción deformada por la superficie del objeto. A continuación se muestran en la figuras 25 (a) y (b) respectivamente, una imagen adquirida en un monitoreo por la cámara 1 y 2, durante el barrido del plano láser.

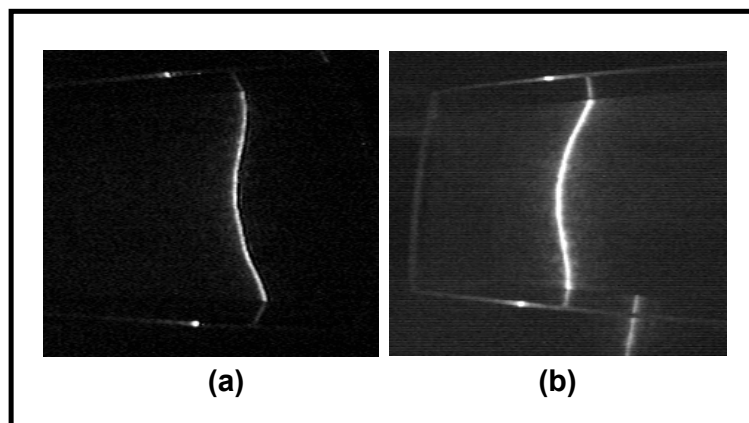


Fig.25. Par de imágenes estereoscópicas (a) CCD 1 (b) CCD 2.

3.3.2. Procesamiento de imágenes

3.3.2.1. Cálculo de las coordenadas de los puntos homólogos A_1 y A_2

Usando el método de visión estereoscópica se obtienen las coordenadas tridimensionales distorsionadas en el sistema coordenado de la cámara de los puntos A_1 y A_2 , dichos puntos corresponden a la intercepción del plano láser con los bordes del recipiente (figura 26). Sobre la imagen adquirida de cada cámara se deben identificar los puntos de intercepción A_1 y A_2 que sirven de referencia global para repositonar la reconstrucción tridimensional de la topografía del volcán.

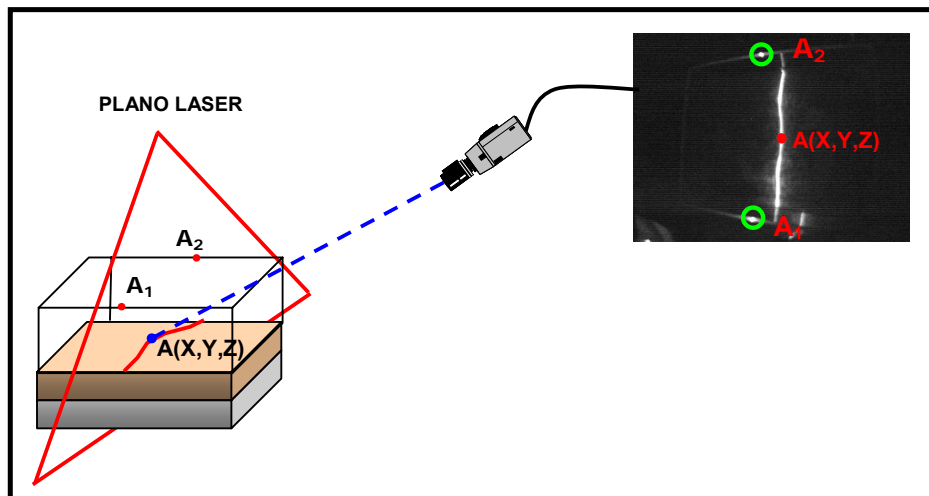


Fig.26. Intersección del plano láser con los puntos A_1 y A_2 que sirven de referencia global para repositonar la reconstrucción tridimensional de la topografía del volcán.

Para obtener las coordenadas de los puntos homólogos de A_1 y A_2 en cada imagen, se selecciona individualmente la región de la imagen que contiene dichos puntos y se realiza una binarización escogiendo un valor de umbral de intensidad adecuado. Una vez la imagen está binarizada, se determinan las coordenadas (u', v') del centro geométrico de estos puntos, (indicación roja en la figura 26). Se hallan las coordenadas (u,v) libre de distorsión del centro geométrico de los puntos homólogos de A_1 y A_2 , aplicando el procedimiento descrito en la sección 2.4 (Indicación verde en la figura 27).

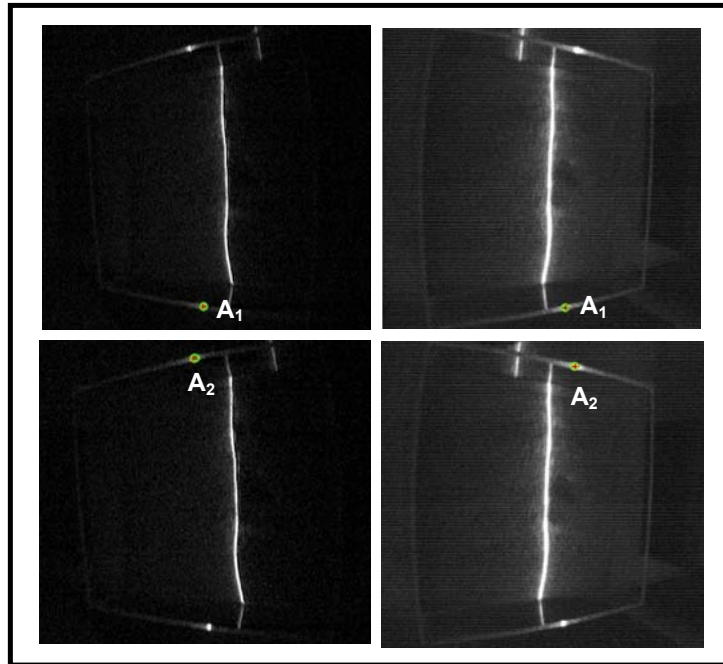


Fig.27. Determinación de las coordenadas de los puntos A_1 y A_2 . La indicación roja indica los puntos con distorsión y la verde los puntos libres de distorsión.

A partir de las coordenadas en píxeles de los puntos A_1 y A_2 se calcula sus correspondientes coordenadas (x_u, y_v) en mm. Con estos puntos y con la coordenada $O_C(0,0,0)$ se calcula la ecuación de la recta en el sistema coordenado de la cámara. (Figura 17). Es decir, de cada cámara se conocen las dos ecuaciones de las rectas que pasan por A_1 y A_2 , en el sistema coordenado de las cámaras. De esta manera, matemáticamente, la intersección de las dos rectas que pasan por A_1 provenientes de cada cámara permite calcular las coordenadas del punto en el sistema coordenado del objeto. Un procedimiento similar se hace para el punto A_2 . Experimentalmente y debido a la influencia de la discretización de la imagen, las dos rectas no se interceptan en el espacio, haciéndose necesario el cálculo del punto que minimice la distancia entre las rectas. Experimentalmente se obtuvo el mínimo error al buscar la mínima distancia entre las rectas usando la coordenada z constante.

3.3.2.2. Cálculo de las coordenadas de la línea láser

Para obtener los puntos centrales de cada línea, primero se realiza la segmentación de la línea láser y después se realiza la binarización de la imagen escogiendo el valor del umbral de intensidad adecuado. Luego, se determinan los puntos centrales de la línea. Este procedimiento se realiza para cada imagen adquirida en el barrido láser. La figura 28 muestra el resultado obtenido para una de las imágenes obtenidas con una cámara.

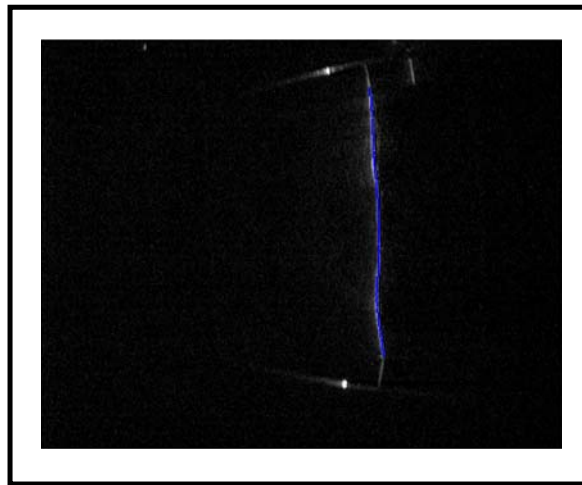


Fig.28. Determinación de los puntos centrales de la línea láser

3.3.2.3. Procedimiento de reconstrucción 3D

El procedimiento de reconstrucción tridimensional para determinar la topografía de los volcanes de lodo se realiza ubicando el plano láser en un extremo del objeto y se hace un barrido en dirección perpendicular a la línea láser, cada cámara adquiere una perspectiva diferente de la línea de intercepción deformada por la superficie del objeto. Sobre cada imagen se identifican las coordenadas de los puntos de intercepción A_1 y A_2 descritos anteriormente y que sirven de referencia global para reposicionar la reconstrucción tridimensional que realiza la cámara. Conociendo las coordenadas en el sistema de referencia del objeto de estos puntos y la posición del eje de

rotación $\overline{AA'}$, se calcula la ecuación del plano láser que contiene a A_1 , A_2 y $\overline{AA'}$, y es de la forma:

$$N_x X + N_y Y + N_z Z = \vec{N} \cdot \vec{r}_1 \quad (32)$$

Donde $\vec{N} = (N_x + N_y + N_z)$ es el vector normal a plano que contiene A_1 , A_2 y $\overline{AA'}$. \vec{r}_1 es un vector del plano que podría ser \vec{A}_1 . Las coordenadas de \vec{N} se obtienen usando las coordenadas de los puntos A_1 , A_2 y $\overline{AA'}$ que pertenecen al plano.

Para cada cámara, se calculan las coordenadas de los puntos centrales de la línea láser deformada por la superficie, como se mencionó anteriormente. Para cada punto se hace un procedimiento similar al mencionado en la sección 2.4, para calcular la ecuación de la recta que pasa por \vec{O}_c y por el punto. Conociendo esta ecuación y la ecuación del plano láser, se calculan las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) de cada punto central de la línea láser.

Repitiendo el procedimiento anterior para las diferentes posiciones angulares del plano láser sobre la superficie se obtiene la reconstrucción 3D muestreada de la superficie del objeto. La figura 29 muestra una Reconstrucción tridimensional del modelo análogo en un instante dado.

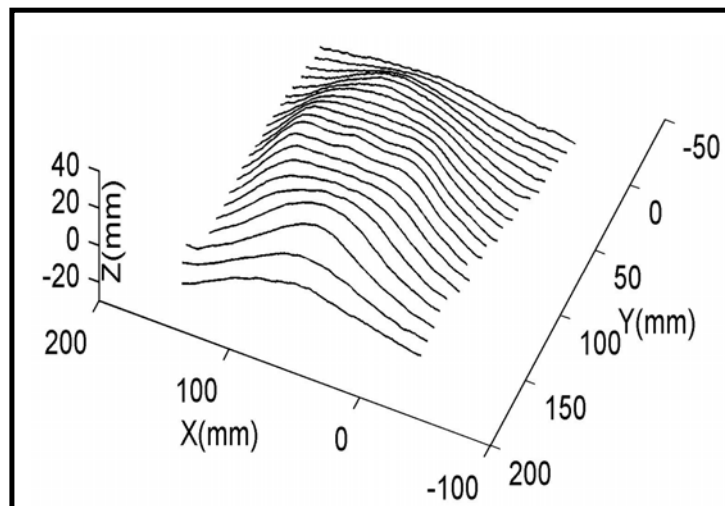


Fig.29. Reconstrucción 3D de la superficie topográfica del volcán de lodo.

Siguiendo el procedimiento de reconstrucción y el procedimiento de calibración explicado anteriormente, se reconstruyeron varios objetos. Las siguientes figuras muestran la reconstrucción 3D de diferentes objetos. La figura 30 muestra la reconstrucción 3D en para cada línea proyectada y la figura 31 la reconstrucción 3D realizando interpolando puntos de la figura 30.

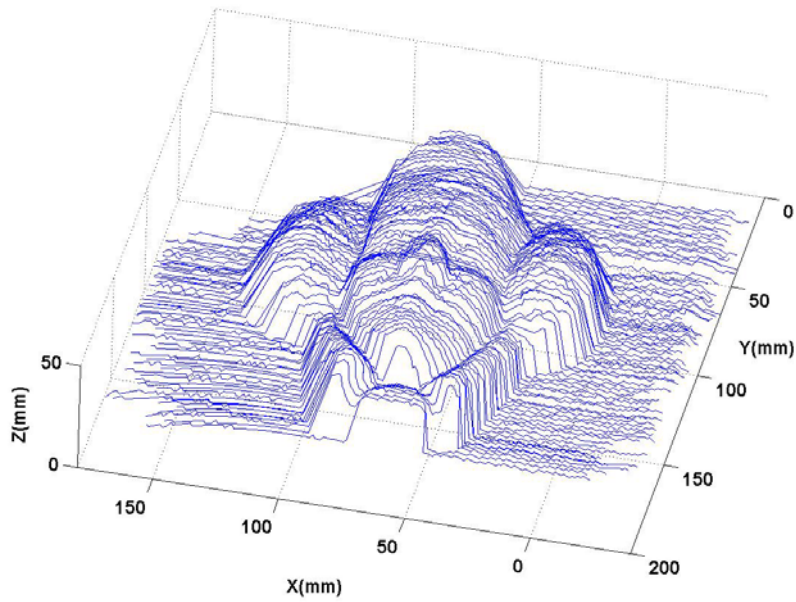


Fig.30. Reconstrucción 3D en bruto del objeto

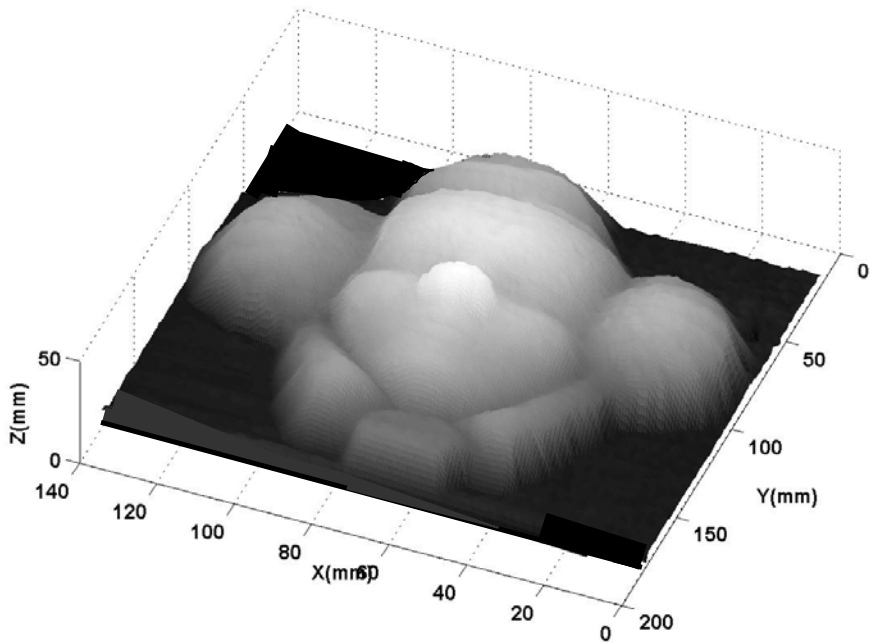


Fig.31. Reconstrucción 3D utilizando el método de interpolación.

3.4. ANÁLISIS DE ERROR EN EL CÁLCULO DE COORDENADAS TRIDIMENSIONALES (X,Y,Z)

Partiendo del algoritmo de reconstrucción 3D, se realiza un análisis de error en el cálculo de Z para objetos de forma conocida. Los objetos utilizados fueron cilindros de 100 y 50 mm de altura los cuales se ubicaron en diferentes posiciones (x,y), con el fin de hallar los errores en el cálculo de z en función de la posición transversal.

Las figuras 32 y 33 muestran la imágenes con las diferentes posiciones el plano de referencia de los cilindros, para cada cámara. El procedimiento de Reconstrucción 3D puede resumirse de la siguiente manera:

1. Determinación de las coordenadas en píxeles del centro geométrico del círculo a altura máxima en cada cilindro. Como la imagen de cada cilindro posee buen contraste, se binariza y luego se calcula el centro geométrico.
2. Eliminación de distorsiones y cálculo de la ecuación de las rectas que pasan por el centro geométrico del círculo superior de cada cilindro.
3. Cálculo de las coordenadas (X_w, Y_w, Z_w) del centro de cada cilindro con su altura máxima. Las coordenadas se encontraron interceptando las rectas que pasan por cada cilindro y provenientes de cada cámara. Los resultados reportados corresponden a los puntos tridimensionales encontrados al minimizar la distancia entre las rectas calculadas a igual coordenada z.

Las tablas 6 y 7 muestran los resultados obtenidos para los dos cilindros. Para el cilindro de 50 mm de altura se encuentra un error medio en el cálculo de la coordenada z de 0.49 mm en todo el campo de observación y de 0.43 mm para el cilindro de 100 mm de altura.

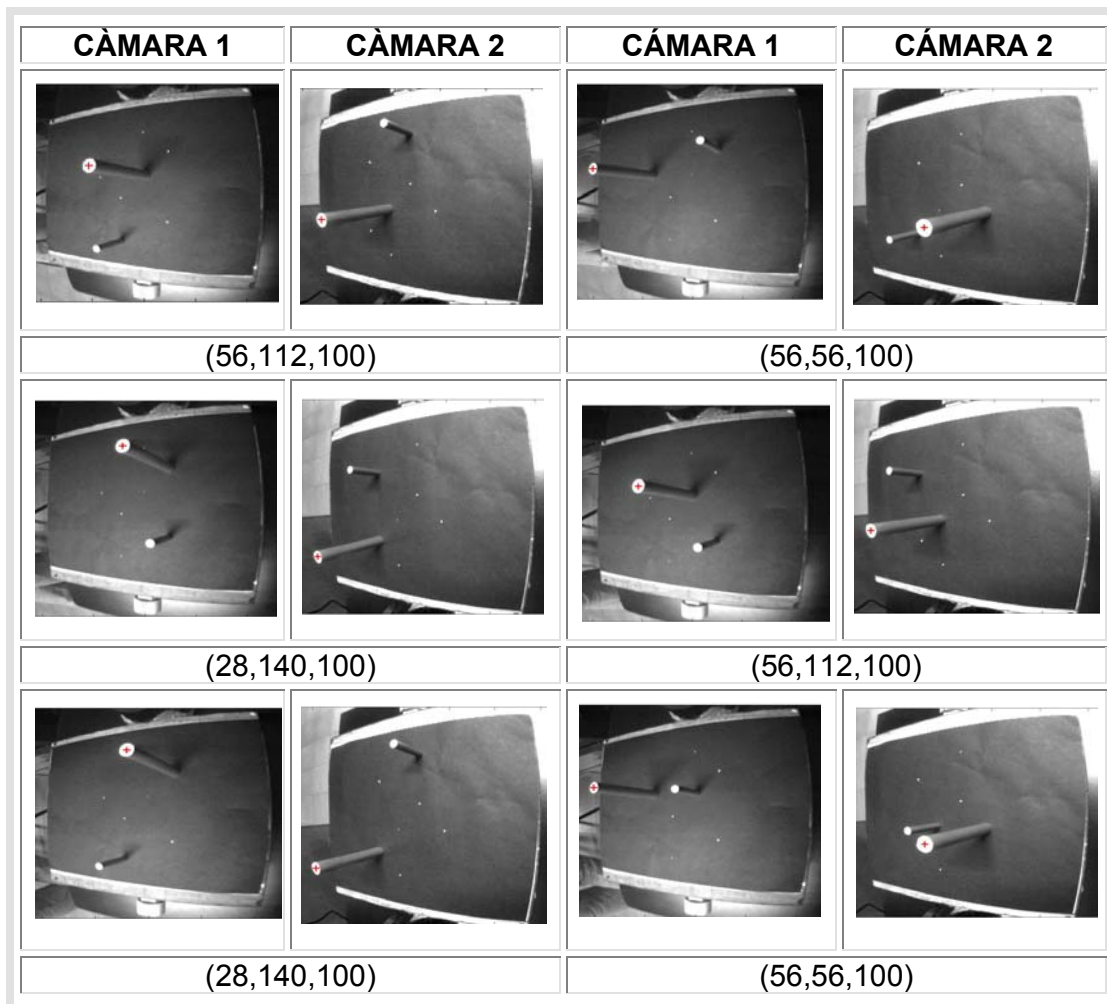


Fig.32. Posiciones (X,Y,Z) de los puntos homólogos del centro de masa del objeto de 100 mm de altura.

| Posición real (x, y) (mm) | Altura real Z (mm) | Posición encontrada (x, y) (mm) | Altura encontrada Z (mm) | Error (mm) | | |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------|------|------|
| | | | | X | Y | Z |
| (56,112) | 100 | (56.94, 111.84) | 99.01 | 0.94 | 0.15 | 0.99 |
| (56,56) | | (56.41, 57.65) | 99.98 | 0.41 | 1.65 | 0.02 |
| (28,140) | | (28.49, 138.24) | 99.73 | 0.49 | 1.75 | 0.27 |
| (56,112) | | (56.68, 111.08) | 99.15 | 0.68 | 0.92 | 0.85 |
| (28,140) | | (26.72, 139.40) | 99.66 | 1.28 | 0.59 | 0.34 |
| (56,56) | | (55.19, 56.07) | 99.88 | 0.80 | 0.07 | 0.12 |

Tabla 6. Posición real y posición encontrada de las coordenadas de centro de masa (X,Y,Z) y calculo de error para el objeto de 100 mm de altura.

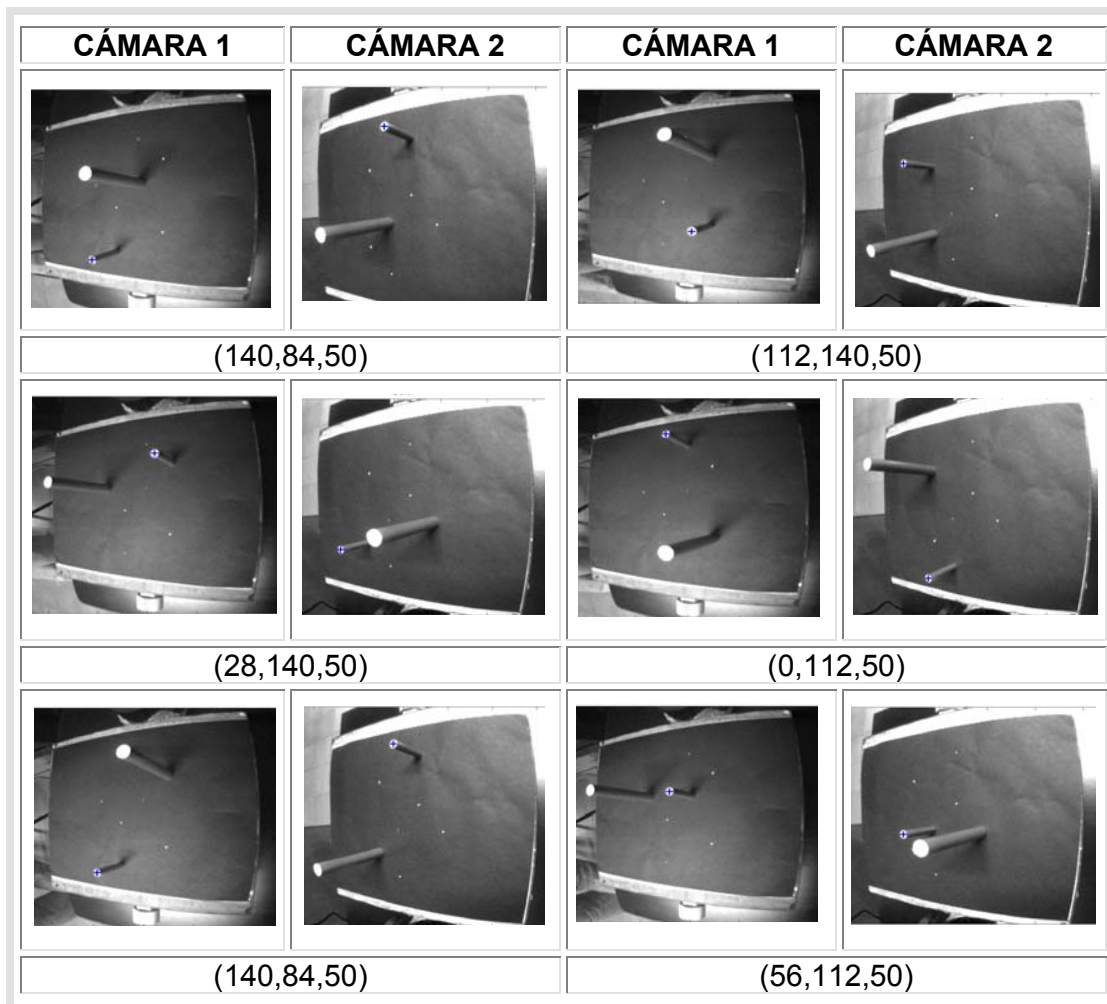


Fig.33. Posiciones (X,Y,Z) de los puntos homólogos del centro de masa del objeto de 50 mm de altura.

| Posición real (x, y) (mm) | Altura real Z (mm) | Posición encontrada (x, y) (mm) | Altura encontrada Z (mm) | Error (mm) | | |
|------------------------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------|------|------|
| | | | | X | Y | Z |
| (140,84) | 50 | (141.82, 85.88) | 48.88 | 1.82 | 1.88 | 1.12 |
| (28,140) | | (27.38, 140.84) | 50.23 | 0.61 | 0.84 | 0.23 |
| (0,112) | | (-0.27, 112.00) | 50.02 | 0.61 | 0.84 | 0.02 |
| (112,140) | | (112.84, 141.94) | 51.38 | 0.84 | 1.94 | 1.38 |
| (140,84) | | (140.35, 84.38) | 49.96 | 0.35 | 1.38 | 0.04 |
| (56,112) | | (55.92, 112.32) | 50.17 | 0.08 | 0.32 | 0.17 |

Tabla 7. Posición real y posición encontrada de las coordenadas de centro de masa (X,Y,Z) y calculo de error para el objeto de 50 mm de altura

3.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta sección se calcula la precisión del método, comparando las medidas obtenidas por el método óptico y las obtenidas con el método por contacto. De igual manera se evalúa el sistema de reconstrucción 3D en el campo geológico al estudiar el comportamiento de los volcanes de lodo. Estos datos tridimensionales son comparados con las medidas cualitativas arrojadas en estudios anteriores.

3.5.1. PRECISIÓN

Para evaluar la precisión del sistema implementado se reconstruyen objetos de alturas conocidas, de esta forma se puede comparar la medida reportada por el sistema de reconstrucción y la medida obtenida por un método de contacto, de precisión conocida. En el método de contacto se utilizó un calibrador, el cual se ubica en un extremo del objeto y se va desplazando de forma paralela al plano de referencia haciendo contacto continuamente con la superficie del cuerpo, para reportar la altura en diversos puntos del cuerpo. La precisión de la altura medida depende del calibrador, el cual tiene un rango de precisión de ± 0.05 mm. La figura 34 muestra la reconstrucción 3D del objeto de prueba. usando el sistema óptico implementado

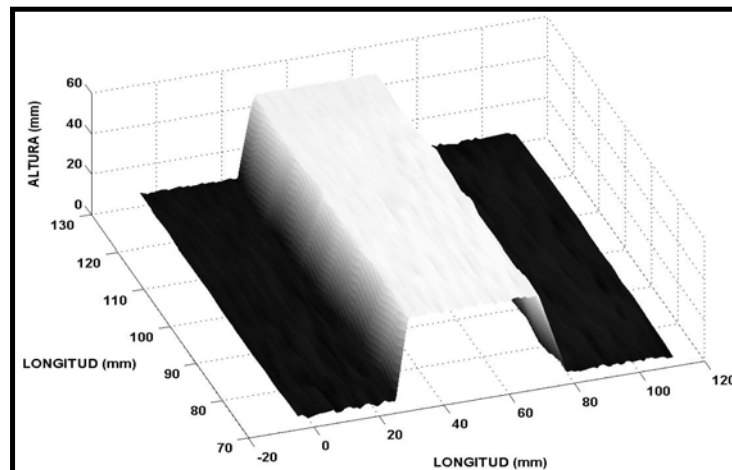


Fig 34. Reconstrucción tridimensional del cuerpo utilizado

La figura 35 muestra un corte transversal realizado sobre la imagen de reconstrucción 3D. La línea a trazos sobre la figura indica el valor promedio de altura medido con el calibrador a diferentes posiciones sobre el objeto y correspondiente a $40.2 \pm 0.05 \text{ mm}$. La altura obtenida de la reconstrucción 3D corresponde a $39.7 \pm 0.05 \text{ mm}$.

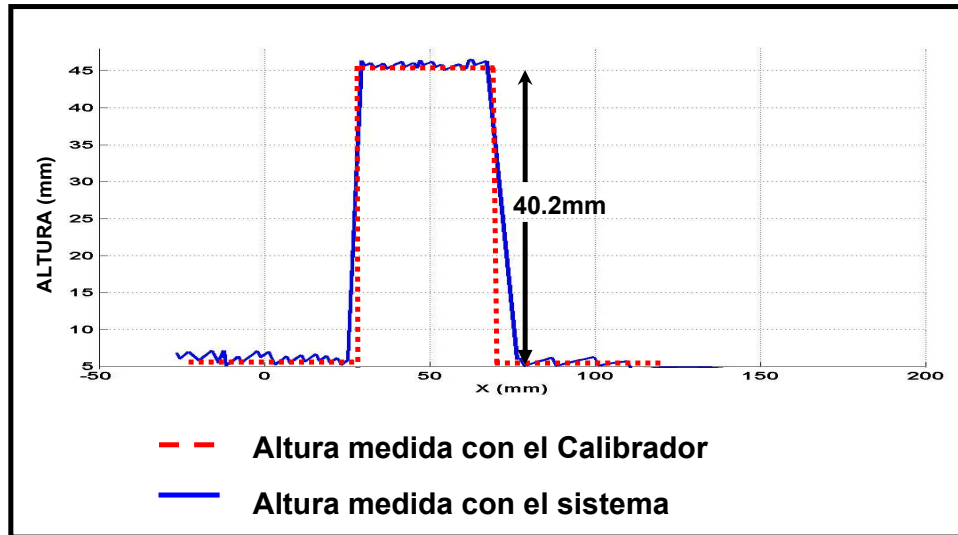


Fig 35. Corte realizado sobre la figura de reconstrucción 3D

Los valores anteriores nos indican que existe una fuerte coincidencia entre los valores indicados por el calibrador y el sistema de reconstrucción 3D, y corresponde al rango de error encontrado en la sección anterior.

3.6. ANÁLISIS CUANTITATIVO DEL VULCANISMO DE LODO

El objetivo final de este trabajo consiste en reconstruir la forma 3D de un cuerpo con presencia de discontinuidades que evoluciona con el tiempo, a partir de un sistema coordenado global. Se pretende, por lo tanto, determinar la evolución temporal de dicho fenómeno geológico a escala, sometido a condiciones ambientales controladas. En las secciones siguientes se muestra el procedimiento experimental para la preparación de los modelos análogos, la exposición controlada, los monitoreos realizados y el análisis de los datos.

3.6.1. DISEÑO DE MODELOS ANÁLOGOS

Como se mencionó en el capítulo 1, para realizar el montaje de los modelos análogos, se utilizó una caja vidrio de dimensión 20 cm x 20 cm de base y 16cm de altura, previamente rotulada y en su interior una capa de 7cm de lodo, una primera capa impermeable de 5 mm de espesor (gelatina sin sabor), otra capa impermeable de 5 mm de espesor, cuya finalidad es sellar la primera capa impermeable es decir, evitar la fuga de fluidos de lodo y finalmente una capa tope de arena de 3 cm de espesor. Ver figura (2). Una vez se ha configurado el diseño del modelo análogo se procede a medir la variación temporal de la superficie externa de los volcanes de lodo, dicha variación es debida al impulso generado por los gases al interior del volcán.

3.6.2. ETAPAS DE EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL VOLCÁN DE LODO

Se evidencia etapas de cambio, claramente constituidas en la formación del domo sobre la superficie del volcán [7]:

❖ **ETAPA 0:** Estado inicial del montaje. Es el punto de partida de los experimentos, comienza inmediatamente después de realizado el diseño final del modelo análogo. Se presenta una superficie plana y sin deformación. Sobre la superficie se trazan líneas paralelas y rectangulares formando una retícula.

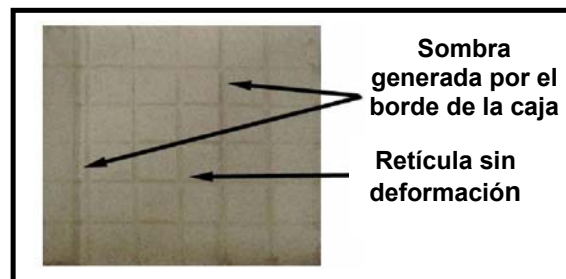


Fig 36. Etapa 0

- ❖ **ETAPA 1:** Abombamiento Inicial. En esta etapa se inicia la formación del domo, esto se indica por la deformación de la retícula trazada en la superficie del volcán.

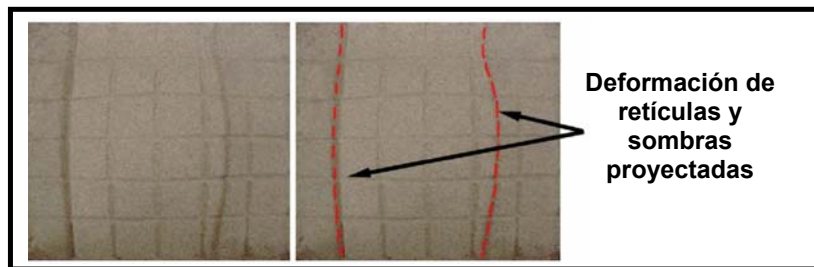


Fig 37. Etapa 1

- ❖ **ETAPA 2:** Formación de estrías. Se observa formación de estrías en dirección radial en la cima del domo. La elevación de la estructura aumenta con respecto a la etapa anterior.

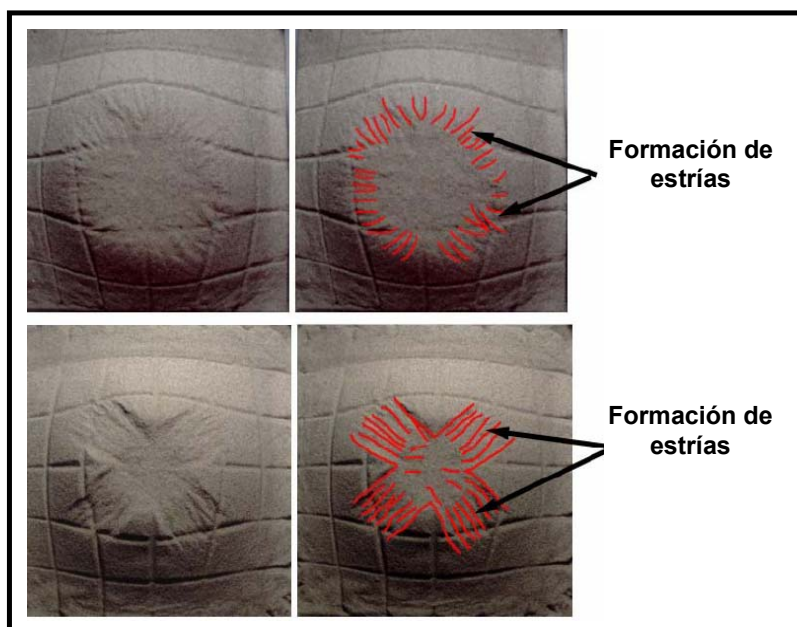


Fig 38. Etapa 2

- ❖ **ETAPA 3:** Formación del domillo central. Se evidencia formación de un domillo central en la superficie del domo, en esta etapa se observa la altura máxima producida por el volcán de lodo.

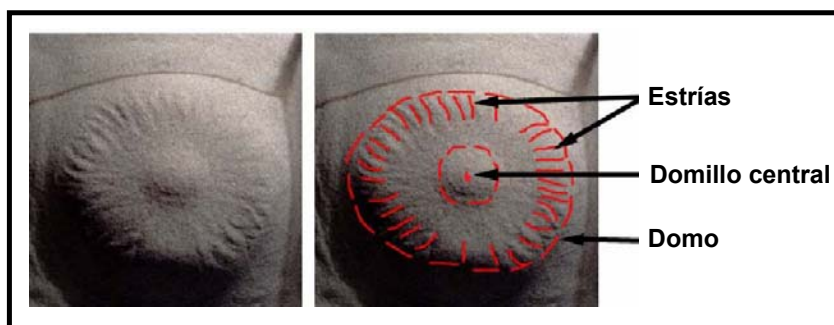


Fig 39. Etapa 3

- ❖ **ETAPA 4:** Explosión del domo: Esta etapa es muy corta su duración es de solo segundos en este momento se emana gases y en algunas ocasiones se expulsa material de la superficie del volcán.
- ❖ **ETAPA 5:** Formación de Cráter. En esta etapa se evidencia la formación de un cráter en la cima del domo, esta formación puede presentarse simultánea o inmediatamente después de la explosión.

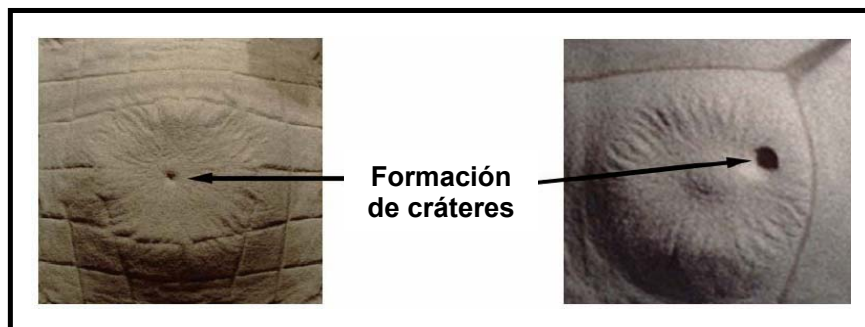


Fig 40. Etapa 5

- ❖ **ETAPA 6:** Colapso de la estructura. En esta etapa se evidencia el descenso de la altura del domo después de alcanzar la máxima elevación. En presencia de cráteres, el colapso va acompañado de emanación de lodo o fluidos.

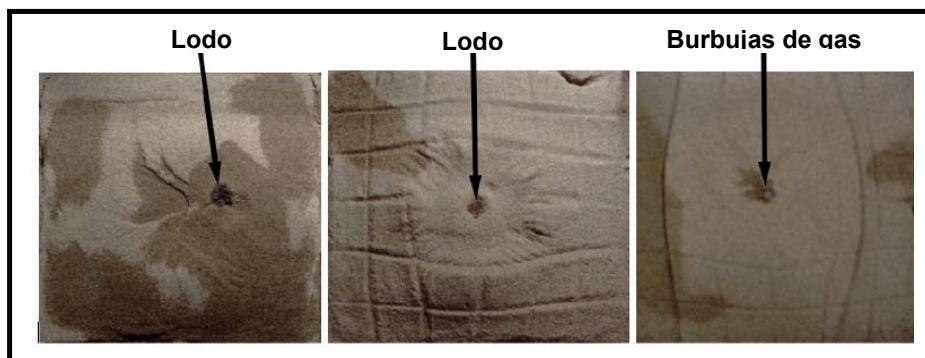


Fig 41. Etapa 6

- ❖ **ETAPA 7:** Hundimiento Final. Luego del colapso se evidencia la superficie del volcán deformada en forma de grietas.

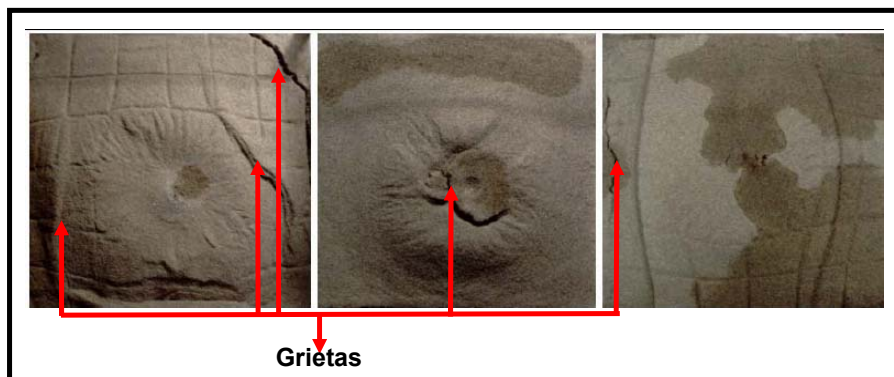


Fig 42. Etapa 7

3.7. MONITOREO POR INSPECCIÓN VISUAL

Para monitorear el comportamiento dinámico de los volcanes de lodo, el geólogo tradicionalmente mide las alturas con una regla métrica graduada en milímetros, la cual se ubica en la cara frontal de cada caja, en forma vertical (figura 43). En todos los casos la medida se tomó en el punto del domo cuya altura mostraba la mayor elevación. Este punto se ubicó deslizando la regla métrica horizontalmente. Para tomar la medida de registro, el observador se ubicó perpendicular a la regla métrica.

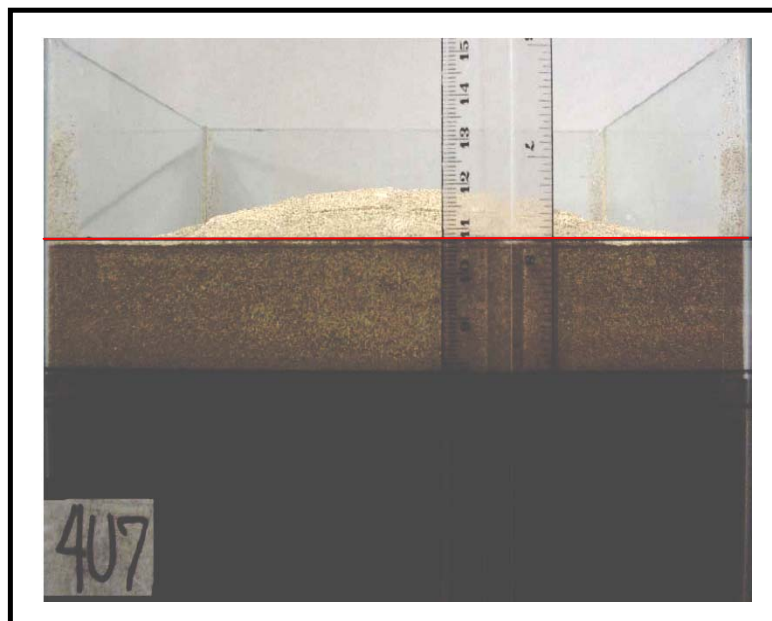


Fig 43. Medidas de altura. Ejemplo: 4U7 después de 12 horas de exposición. La línea roja es la referencia a partir del cual se medirá la altura del domo.

Las siguientes figuras muestran la evolución de un volcán de lodo y las alturas tomadas a partir de la regla métrica.

3.7.1. MODELO ANÁLOGO 6U7

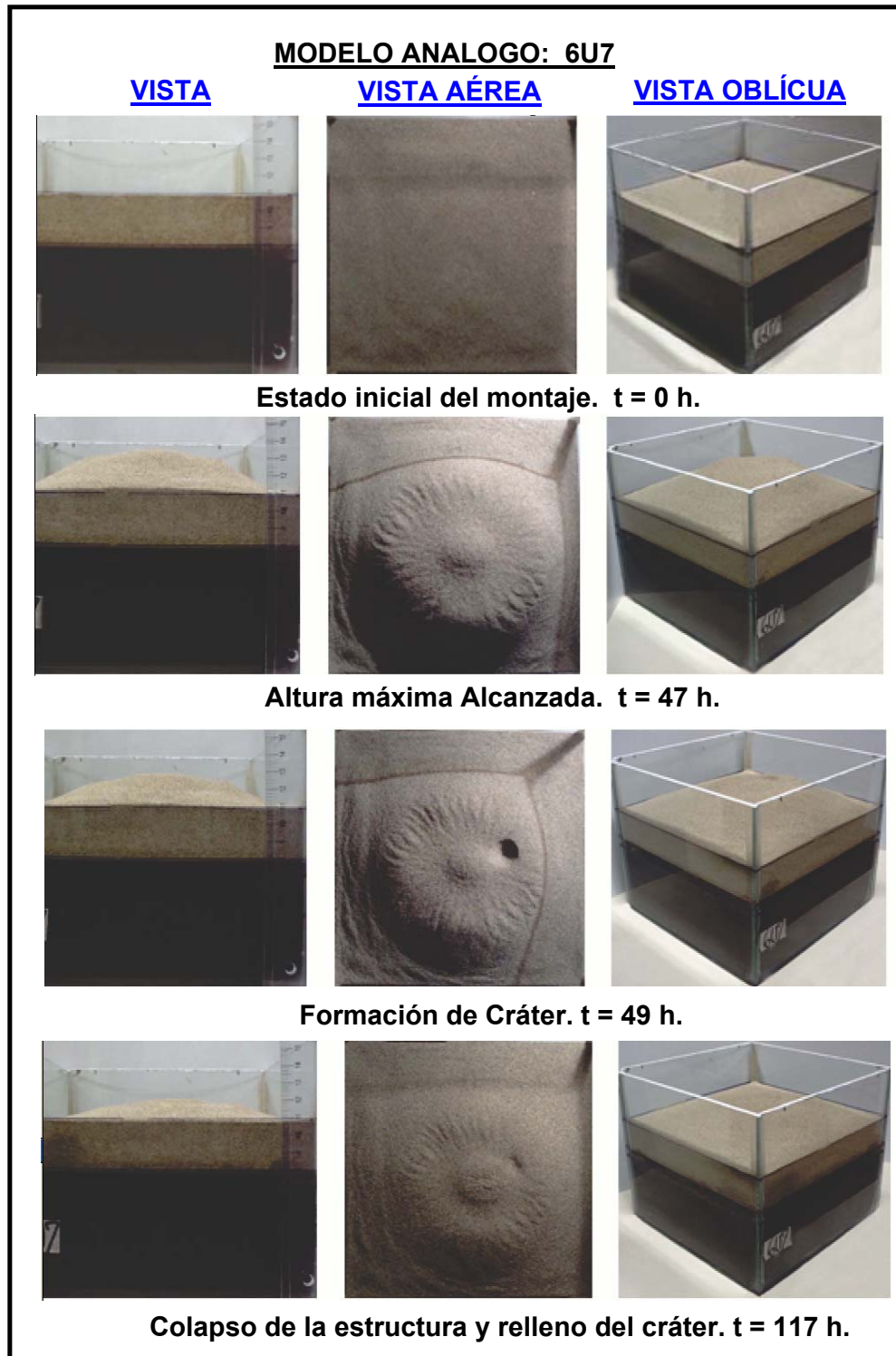


Fig 44. Evolución temporal del domo del volcán de lodo

La tabla 8 muestra la relación cualitativa entre la variación de altura del domo y el tiempo de evolución del mismo del modelo 6U7.

| MODELO 6U7 | |
|--------------------------|--------------------|
| Tiempo de Exposición (h) | Altura Máxima (mm) |
| 0 | 0 |
| 47 | 39 |
| 49 | 24 |
| 117 | 19 |

Tabla 8. Medidas de altura del domo del modelo 6U7

3.7.2. MODELO ANÁLOGO 6U9

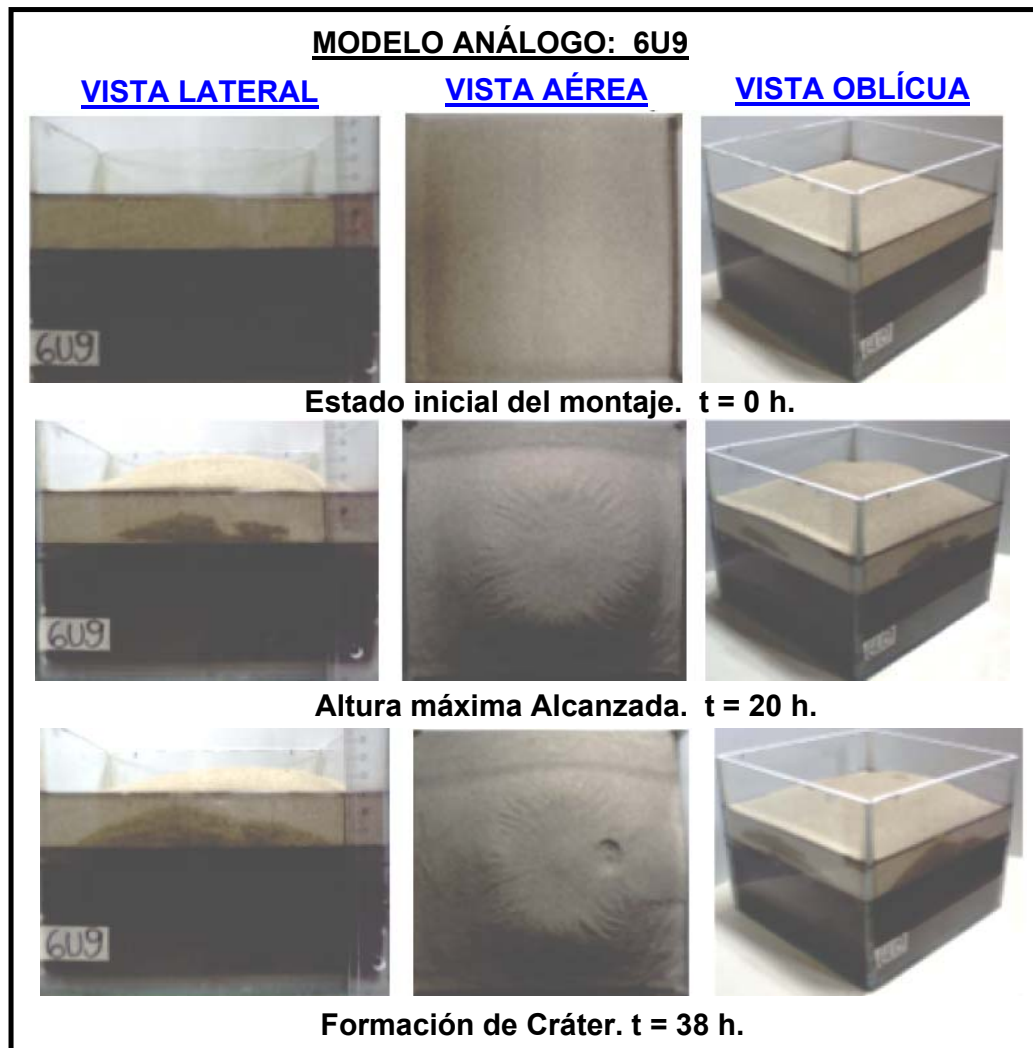




Fig 45. Evolución temporal del domo del volcán de lodo

La Tabla 9 muestra la relación cualitativa entre la variación de altura del domo y el tiempo de evolución del mismo del modelo 6U7.

| MODELO 6U9 | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Tiempo de exposición (h) | Altura máxima (mm) |
| 0 | 0 |
| 20 | 34 |
| 38 | 19 |
| 50 | 19 |

Tabla 9. Medidas de altura del domo del modelo 6U7

Debido a que la medida registrada por la regla métrica genera incertidumbre, es necesario calcular la forma tridimensional de la superficie del domo en cualquier instante de tiempo

3.8. MONITOREOS POR RECONSTRUCCIÓN 3D

Utilizando el sistema óptico de reconstrucción tridimensional mostrado en la figura (7), y siguiendo el procedimiento de reconstrucción, se calculó la forma 3D de la evolución temporal del domo, obteniendo los siguientes resultados.

3.8.1. MODELO ANALOGO 6U7

La figura 46 muestra el estado 3D de la superficie del volcán de lodo en el monitoreo 0 en donde no se presenta deformación de la superficie del volcán de lodo. La figura 47 muestra el estado del domo después de 47 horas de exposición, se evidencia la altura máxima, indicando formación de gases al interior del volcán. Estos gases se acumulan en la base de la capa impermeable aumentando la presión hasta romper dicha capa, generando una estructura cómica que posiblemente fue producto del ascenso de material (gas, lodo y demás fluidos contenidos en éste). Analizando la secuencia 3D de reconstrucción en los diferentes monitoreos, se observa que a las 49 horas de exposición, figura 47, el material en ascenso atraviesa las capas suprayacentes hasta llegar a expresarse como un cráter la superficie del domo. Durante las 117 horas de exposición, se evidencia el colapso de la estructura, es decir se observó el descenso de la altura del domo, el cráter emanaba fluidos. La curva trazada en la figura muestra el proceso de evolución del volcán.

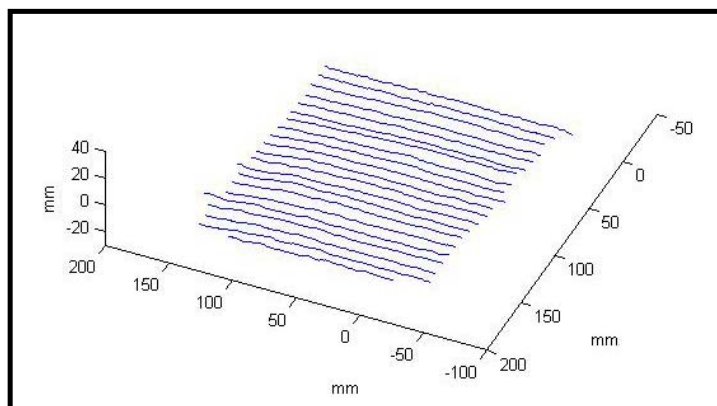


Fig 46. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 0 h de evolución.

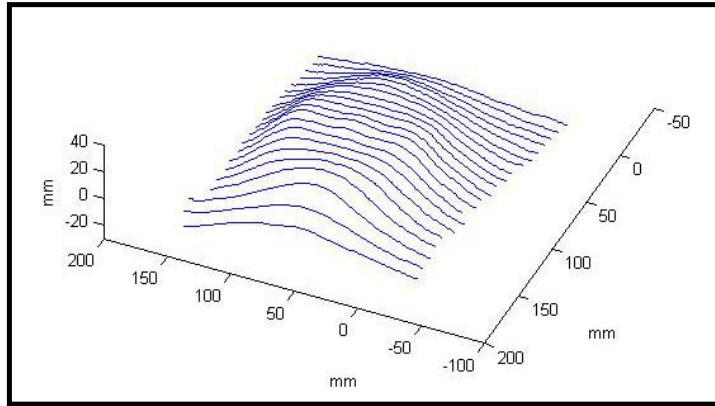


Fig 47. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 47 h de evolución.

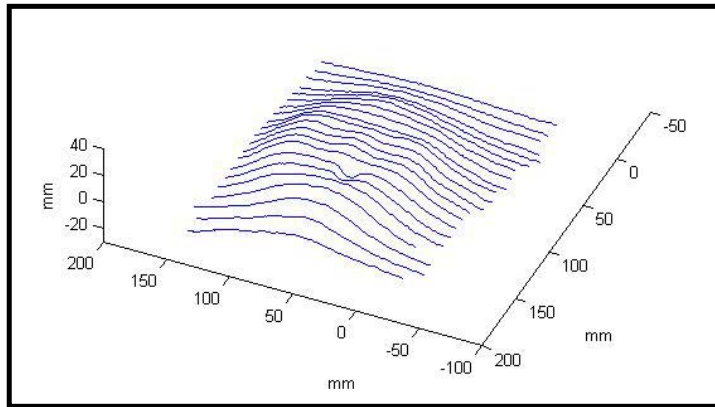


Fig 48. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 49 h de evolución.

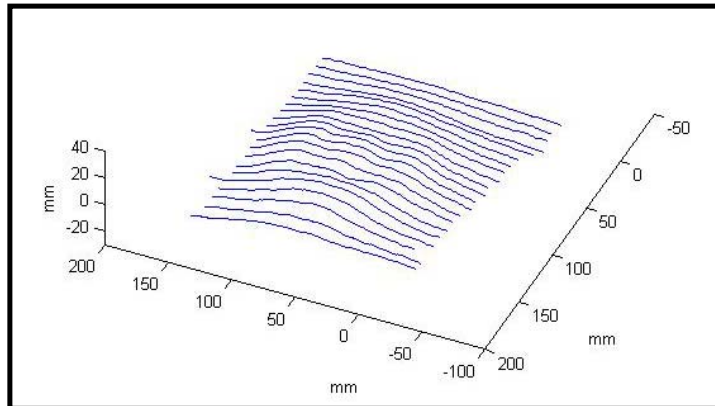


Fig 49. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 117 h de evolución.

La tabla 10 la figura 50 muestra la relación de aturas obtenidas por el sistema de reconstrucción tridimensional en función del tiempo de exposición. De igual manera se calcula la variación del volumen de la superficie del domo.

| Tiempo de exposición (h) | Altura máxima (mm) | Volumen promedio (mm ³) |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 2 | 19.42 | 737.96 exp 3 |
| 10 | 21.94 | 833.72 exp 3 |
| 47 | 37.53 | 1,426.14 exp 3 |
| 49 | 26.72 | 1,015.36 exp 3 |
| 95 | 20.36 | 773.68 exp 3 |
| 117 | 17.72 | 673.36 exp 3 |

Tabla 10. Medidas de altura obtenidas por el sistema de Reconstrucción Tridimensional.

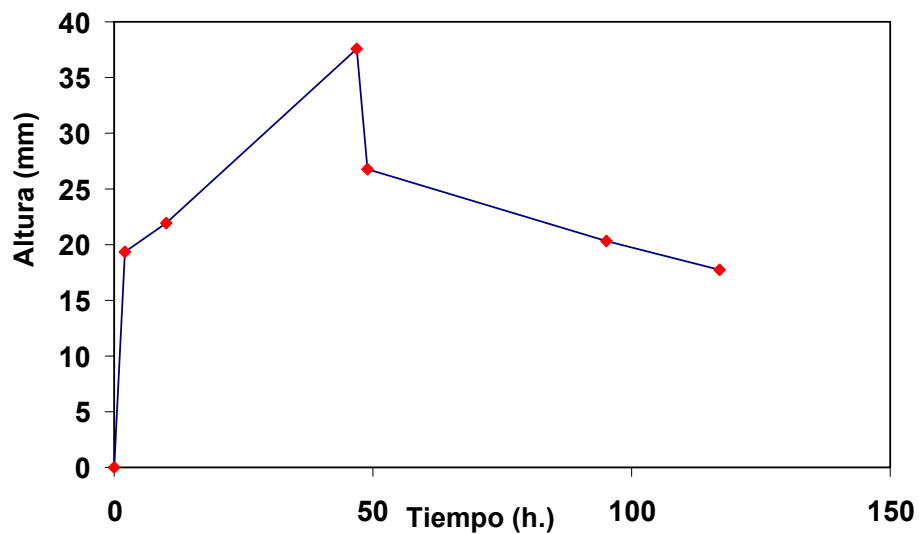


Fig 50. Relación entre el tiempo de evolución y la altura del domo

3.8.2. MODELO ANÁLOGO 6U9

La figura 51 muestra el estado 3D de la superficie del volcán de lodo en el monitoreo 0, en este momento no hay deformación de la superficie del volcán. Después de 20 horas de exposición, se evidencia la formación de un domo

simétrico, indicando formación de gases al interior del volcán. Durante las 38 horas de exposición se observa el descenso abrupto del domo por expulsión del material dejando un cráter cercano al centro del domo. Después de haber transcurrido 50 hrs de exposición, se observan grietas incipientes hacia los límites del modelo. Hacia las 110 hrs se deforma la superficie por causa del colapso.

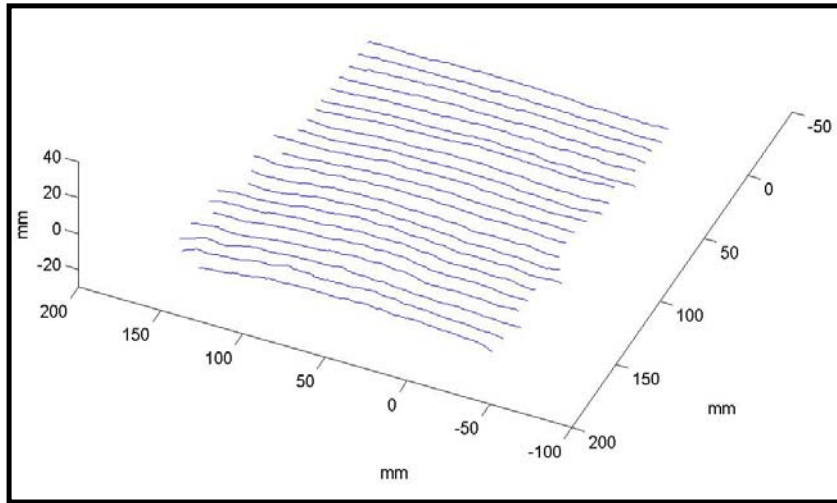


Fig 51. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 0 h de evolución

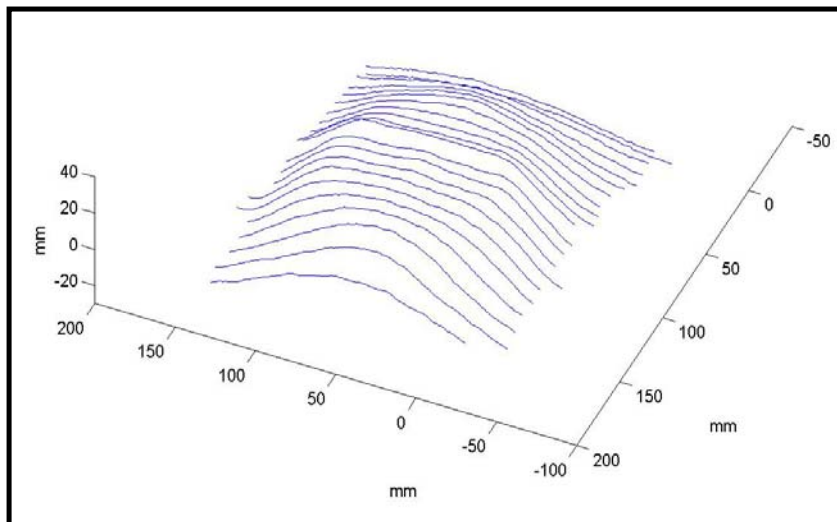


Fig 52. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 20 h de evolución

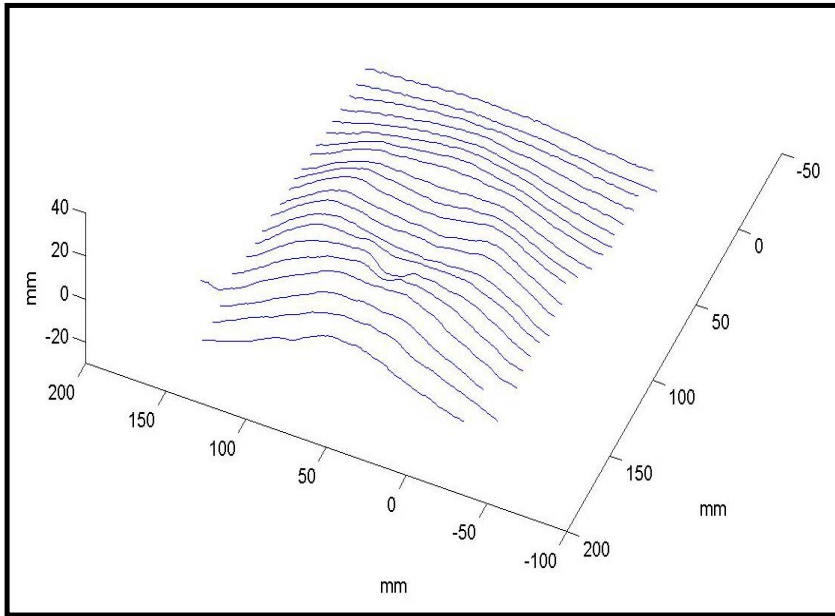


Fig 53. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 38 h de evolución

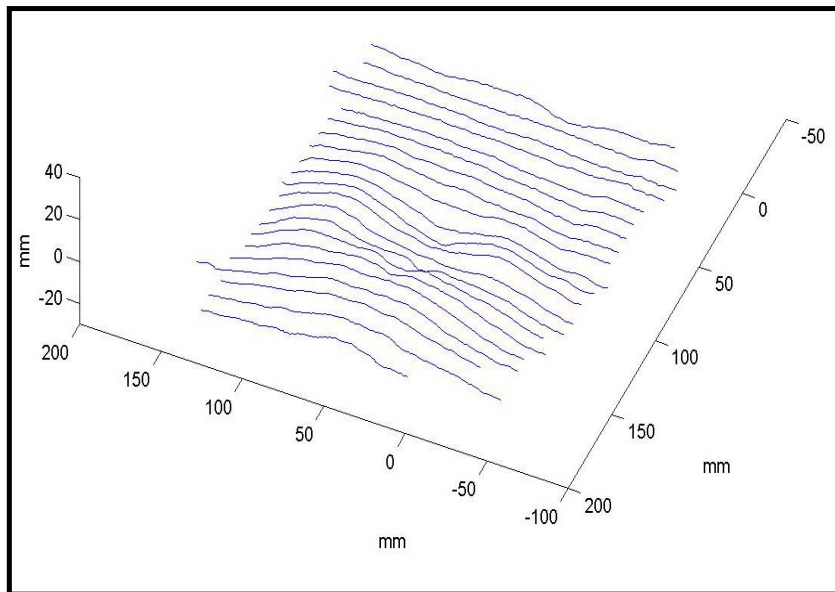


Fig 54. Reconstrucción 3D de la superficie del volcán. 110 h de evolución

| MODELO 6U9 | | |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Tiempo de exposición (h) | Altura máxima (mm) | Volumen Promedio (mm ³) |
| 0 | 0 | 0 |
| 20 | 32.12 | 1,220.56 exp. 3 |
| 38 | 21.32 | 810.16 exp. 3 |
| 50 | 20.83 | 791.54 exp. 3 |
| 53 | 19.24 | 731.12 exp. 3 |

Tabla 11. Medidas de altura obtenidas por el sistema de Reconstrucción Tridimensional.

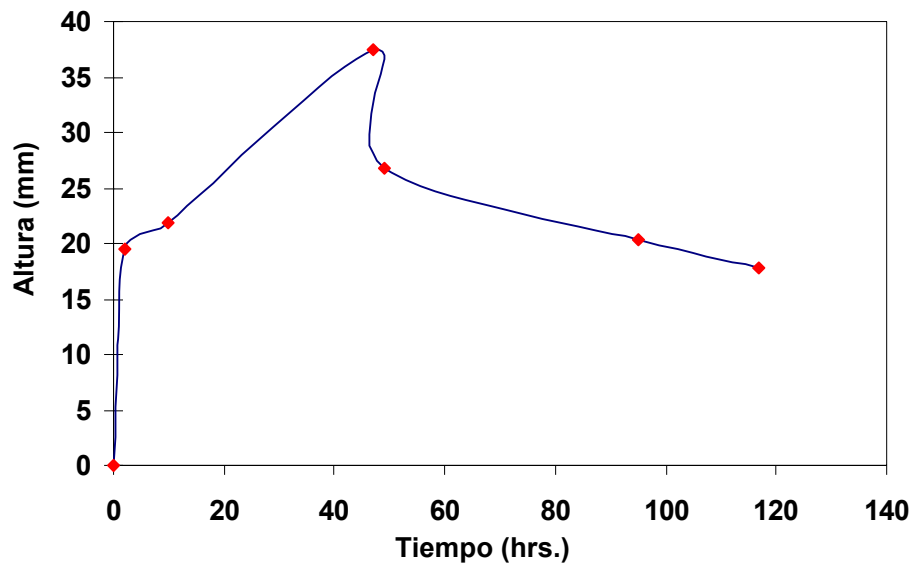


Fig 55. Relación entre el tiempo de evolución y la altura del domo

La Tabla 10 y la figura 55 muestra la relación de altura obtenidas por el sistema de reconstrucción tridimensional en función del tiempo de exposición.

4. CONCLUSIONES GENERALES

En la realización de la presente investigación se puede concluir:

1. Se diseñó y construyó un sistema de reconstrucción 3D por vía óptica a partir de la técnica de triangulación láser y visión estero. El sistema implementado permite la reconstrucción tridimensional de objetos que evolucionan con el tiempo a partir de puntos del objeto que no se deforman en función del tiempo.
2. Se utilizó el sistema de medida 3D para determinar la evolución topográfica de modelos análogos de volcanes de lodo. Se prepararon varios modelos de volcanes de lodo a diferente concentración de lodo, y se observó detalladamente la variación de la superficie con respecto al tiempo de exposición. Los modelos análogos fueron expuestos a las mismas condiciones ambientales hasta observar el colapso de la superficie. A intervalos periódicos, los modelos análogos fueron monitoreados controlando el estado superficial a partir del sistema de medida 3D y el comportamiento geológico a partir de la concentración de lodo al interior del volcán.
3. Se determinó la altura máxima del volcán de lodo durante su evolución por medio del sistema de reconstrucción tridimensional y de manera cuantitativa, a partir una regla métrica graduada en milímetros, generando un error promedio de 2 mm con respecto al sistema óptico de reconstrucción 3D.
4. Desde el punto de vista óptico el sistema implementado combina la visión estéreo y la triangulación láser. Resultado de esta combinación,

no se utiliza el procedimiento estándar de reconstrucción 3D usando triangulación láser. En este método es necesario conocer los parámetros del sistema y hacer un proceso de calibración. La utilización simultánea de la visión estéreo permite:

- a) Eliminar la necesidad de conocer los parámetros del sistema de reconstrucción 3D por triangulación láser, se utilizan los parámetros intrínsecos y extrínsecos para conocer la ecuación del plano láser a una posición angular desconocida y la ecuación espacial al de la recta que pasa por cada punto central de la línea láser y del centro óptico. De la intersección de la recta y el plano se obtienen las coordenadas del punto.
- b) La utilización de dos cámaras y un plano láser permite calcular la altura de los puntos que no son visibles a una cámara pero si a la otra.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. **Schellart, W. P.** Analogue Modeling of Geological Structures. Epsilon Laboratory. 2003.
- [2]. **O'Brien, G. D.** Survey of Diapirs and Diapirism, Diapirism and Diapirs a Symposium, American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Memoir 8, 1-9, 1968.
- [3]. **Yoshihiko Nomura, Michihiro Sagara, Hiroshi Naruse and Atsushi Ide.** Simple Calibration Algorithm for High-Distortion-Lens Camera. 14(11): 1095-1099. 1992.
- [4]. **Weng, J., Cohen, P. and Herniou,** Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI - 14(10): 965-980. 1992.
- [5]. **Heikkilä J. and Silvén O.** A Four-step camera calibration procedure with implicit image correction. Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering, University of Oulu, FIN – 90570 Oulu, Finland.
- [6]. **Faugeras, O.** Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, U.S.A. 1993.
- [7]. **O. González, A Rodríguez.** “Estudio experimental sobre diapirismo de lodo: “relación entre la materia orgánica presente en el lodo y la altura de los domos diapíricos””. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander. 2005.
- [8]. **Z. Ji, M. C. Leu.** Design of optical triangulation devices. Optics & Laser Technology, 21 (5). 1989.
- [9]. **M. Rioux.** Laser range Finder base don synchronized scanners. Applied Optics, 23 (21). 1984.
- [10]. **Torres Miguel.** Reconstrucción confiable de superficies usando rango de disparidad adaptativo. Tesis de Magíster. Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 1998.
- [11]. **Sáez J, Peñalver A y Escolano F.** Estimación de las acciones de un robot utilizando visión estéreo. Departamento de Ciencia y Visión artificial. Universidad de Alicante.
- [12]. **Leu M.C. and Ji Z.** Design of optical triangulation devices, Optics and laser Technology, 21(5), 1989, 335 - 338.

- [13]. **Aracena Diego, Campos Pedro y tosí Clésio.** Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales. Rev. Fac. Ing.- Univ. Tarapacá. 13(1): 57-57. 2005.
- [14]. **Hany Farid and Alin C. Popescu.** Blind removal of lens distortion. Optical Society of America – 18(9): 2072-2078. 2001.
- [15]. **Cochran, W.** Experimental Desings. John Williley & Sons. 1950.
- [16]. **R. C. Gonzáles y R. E. Woods.** Tratamiento digital de Imágenes. Addison Wesley Iberoamericana, S.A, 1996.
- [17]. **M eneses J.** Système optique pour lamesure des deformations dela voute plantaire sous charge statique. Thesè Docteur de L'Université de Franche-Comté, francia.
- [18]. **Patiño A. y Torres E.** Guía de robots autónomos utilizando una cámara CCD, transformada de Hough y Transformada de perspectiva inversa. VII simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial. Bucaramanga, 2002.