

**EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN PLANIMÉTRICA A PARTIR DE
FOTOGRAFÍAS, MEDIANTE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.**

ROMÁN SARMIENTO GÓMEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2008

**EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN PLANIMÉTRICA A PARTIR DE
FOTOGRAFÍAS, MEDIANTE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.**

ROMÁN SARMIENTO GÓMEZ

Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director:

Dr. OSCAR GUALDRÓN GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2008

DEDICATORIA

A Dios Todo Poderoso, fuente inagotable de sabiduría y eterno amor.

A Nuestra Madre protectora, Virgen María, que siempre me acompaña en los momentos difíciles.

A las tres grandes mujeres de mi vida. Mi madre que siempre estuvo a mi lado y me dio su apoyo. Mi esposa, Ana Liliana, lo mejor que me trajo la vida. Mi hija, Ana Sofía, fuente de inspiración y la luz de mis ojos.

A mi gran formador, Mi Padre, al que le debo gran parte de lo soy.

A mis hermanos, compañeros inseparables de esta etapa de la vida.

En memoria póstuma de mi gran amigo Feisal Gabriel “El mono”, como homenaje del tiempo dedicado al estudio de la ingeniería electrónica.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Oscar Gualdrón por la dedicación en la revisión y seguimiento del presente trabajo.

Al Dr. Marlio Paredes Gutiérrez, por la colaboración prestada durante mis cursos de matemáticas, y por sugerirme el campo de trabajo de la geometría proyectiva.

A mi familia en general por permitirme los recursos para alcanzar esta meta.

A mi gran esposa, Ana Liliana Oliveros, por esperarme todo el tiempo posible para realizar mi proyecto. Sin su colaboración y dedicación al hogar no hubiera sido posible nunca esta pequeña meta.

A todos los compañeros de estudio que me prestaron su valiosa colaboración y consejo.

RESUMEN

TÍTULO: EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN PLANIMÉTRICA A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS, MEDIANTE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.*

AUTOR: ROMÁN SARMIENTO GÓMEZ.**

PALABRAS CLAVES: RECTIFICACIÓN, DISTORSIÓN, PERSPECTIVA, PROYECTIVO, ORTO-IMAGEN, PUNTOS DE FUGA, PLANTILLA DE CALIBRACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

La información contenida en las escenas de accidentes de tránsito necesita ser recuperada y preservada directamente en el lugar de los hechos. El uso de fotografías digitales se ve limitado por el efecto de distorsión introducido por la perspectiva.

En el presente documento se describen e implementan técnicas basadas en tratamiento digital de imágenes que permiten corregir los efectos de la perspectiva y posteriormente realizar mediciones sobre la imagen. Devolviendo a un plano contenido las propiedades métricas, mediante transformaciones proyectivas, con el fin de extraer información planimétrica de la imagen. Se plantea un procedimiento de rectificación mediante el uso de relaciones geométricas conocidas – ángulos, longitudes-, junto con información ofrecida por los puntos de fuga presentes en la imagen. El cálculo de las transformaciones inversas se lleva a cabo en el espacio homogéneo coordinado que permite trabajar adecuadamente con puntos y líneas.

Se da al usuario la posibilidad de obtener las coordenadas de puntos de interés en la escena que considere relevantes y obtener una orto-imagen del plano fotografiado, mediante la utilización de una plantilla de calibración. Se explora un modelo básico de distorsión radial para disminuir el error en las mediciones. Finalmente, se presenta la obtención de mediciones sobre huellas de frenado en accidentes de tránsito como aplicación fundamental y se dan a conocer los resultados obtenidos al rectificar imágenes de muestra con sus respectivos errores.

* Modalidad: Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Dr. Oscar Gualdrón Gonzáles.

ABSTRACT

TITLE: EXTRACTION OF PLANIMETRIC INFORMATION FROM PHOTOGRAPHS, USING DIGITAL IMAGE PROCESSING

AUTHOR: ROMÁN SARMIENTO GÓMEZ.**

KEY WORDS: RECTIFICATION, DISTORTION, PERSPECTIVE, PROJECTIVE, ORTHO-IMAGE, VANISH POINT, CALIBRATION TEMPLATE.

DESCRIPTION:

The information contained in the scenes of traffic accidents needs to be recovered and preserved directly into the scene. The use of digital photographs is limited by the effect of distortion introduced by the prospect.

The present document describes and implement techniques based on digital image processing that allow correct the effects of perspective and then make measurements on the image. Returning to the plane contained in the image metric properties through projective transformations, in order to extract information planimetric. It poses a rectification procedure using geometric relationships known - angles, lengths, along with information provided by the vanish point. The calculation of the inverse transformation takes place in the coordinate homogeneous space that allows work properly with points and lines.

It gives the user the ability to obtain the points coordinates of interest in the scene that are relevant and get an ortho-image of the plane photographed using a template calibration. It explores a basic model of radial distortion to reduce the error in the measurements. Finally, it presents obtaining measurements on braking traces in traffic accidents as a key application and presents the results of correct sample images with their respective errors.

* Modality: Degree Work.

**Physics-Mechanics Engineering Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunication School. Director: Dr. Oscar Gualdrón Gonzáles.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCION

1	PRESENTACION DEL PROYECTO	17
1.1	TÍTULO.....	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo general	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2	JUSTIFICACIÓN	18
3	GEOMETRÍA PROYECTIVA.....	19
3.1	GEOMETRÍA PROYECTIVA EN LA HISTORIA DEL ARTE	20
3.1.1	La pirámide visual.....	21
3.2	EL MODELO DE LA CÁMARA.....	22
3.2.1	Modelo de cámara pinhole (cámara oscura).....	22
3.3	PUNTOS Y LÍNEAS DE FUGA.....	23
4	COORDENADAS HOMOGÉNEAS	25
4.1	PUNTOS Y LÍNEAS.....	25
4.1.1	Líneas homogéneas.	25
4.1.2	Puntos homogéneos.....	26
4.1.3	Intersección de líneas.....	26
4.1.4	Línea a través de puntos	26
4.2	COORDENADAS HOMOGENAS ESPECIALES.....	27
4.2.1	Intersección de líneas paralelas	27
4.2.2	Puntos ideales y la línea en el infinito.....	27
5	TRANSFORMACIONES ESPACIALES.....	29
5.1	Mapeo directo.....	30

5.2	Mapeo Inverso	32
6	DESARROLLO.....	34
6.1	las imágenes Utilizadas	35
6.2	Selección de características	38
6.3	Puntos esquina	38
6.4	Puntos de Fuga	39
6.5	Rectificación de las imágenes	42
6.6	Resolución matricial de H	42
6.7	Resolución fraccionada de H.....	44
6.8	CÁlculo de la transformación proyectiva P	45
6.9	CÁlculo de la transformación afín A	46
6.9.1	Mediante ángulos rectos.	46
6.9.2	Mediante ángulos iguales y longitudes conocidas.....	47
6.10	Ubicación de la imagen en el espacio de llegada.....	49
7	INTERFAZ GRÁFICA.....	52
7.1	Elementos compartidos por los módulos	54
7.1.1	Botón Cargar imagen	54
7.1.2	Botón deshacer	54
7.1.3	Botón analizar	54
7.1.4	Botón rectificar puntos.....	55
7.1.5	Limites inferiores y superiores	55
7.1.6	Menús de exportación de datos.	55
7.1.7	Menús de navegación	55
7.1.8	Panel principal.....	56
7.1.9	Overview.	56
7.2	Elementos individuales de cada módulo.....	56
7.2.1	Botón seleccionar puntos	56
7.2.2	Botón Rectificar imagen	57
7.2.3	Botón Puntos de Fuga.....	57

7.2.4	Botón Proyectividad.....	58
7.2.5	Área de selección de características	59
7.2.6	Botón afinidad	61
8	RESULTADOS.....	62
9	VALIDACIÓN	67
9.1	Rectificación de imagen en perspectiva general	69
9.2	Rectificación de imagen con distorsión radial reducida.	79
10	CONCLUSIONES.....	92
11	OBSERVACIONES	94
	BIBLIOGRAFÍA.....	95

LISTA DE FÍGURAS

	Pág.
Figura 1. Pintura pre-renacentista y renacentista.	21
Figura 2. Modelo de la pirámide visual	21
Figura 3. Modelo de cámara pinhole.....	23
Figura 4. Corrección de perspectiva	23
Figura 5. Transformación espacial.....	29
Figura 6. Mapeo directo	31
Figura 7. Huecos y traslapes	32
Figura 8. Mapeo inverso	33
Figura 9. Mapeo indirecto	33
Figura 10. Imagen de referencia.....	35
Figura 11. Formación de la imagen	36
Figura 12. Plantilla de calibración	37
Figura 13. Marcas sobre la escena.....	38
Figura 14. Puntos esquina	39
Figura 15. Línea en el horizonte	40
Figura 16. Rectificación a partir de puntos de fuga.....	41
Figura 17. Aplicación de la transformación proyectiva.....	45
Figura 18. Rectificación mediante ángulos rectos.....	47
Figura 19. Círculos en el plano complejo.....	48
Figura 20. Puntos de fuga en la imagen	49
Figura 21. Incertidumbre en el espacio de llegada	50
Figura 22. Análisis previo de la transformación espacial	51
Figura 23. Módulo de rectificación a partir de cuatro puntos	52

Figura 24. Módulo de rectificación a partir de puntos de fuga e información métrica.....	53
Figura 25. Selección de puntos.....	57
Figura 26. Selección de puntos de fuga.....	58
Figura 27. Selección manual de la intersección.....	60
Figura 28. Imagen distorsionada 1.....	62
Figura 29. Imagen rectificada con rejilla 4 ×12	62
Figura 30. Imagen rectificada mediante puntos de fuga y par de ángulos rectos .	63
Figura 31. Imagen rectificada mediante puntos de fuga, dos ángulos iguales y ángulo de 90°.....	63
Figura 32. Espacio geométrico α y β , ángulos iguales y ángulo conocido	64
Figura 33. Imagen distorsionada 2.....	64
Figura 34. imagen rectificada mediante puntos de fuga; dos ángulos iguales, ángulo conocido de 45° y razón de longitud = 1.	65
Figura 35. Espacio geométrico α y β , dos ángulos iguales, ángulo conocido y razón de longitud	65
Figura 36. Distorsión de perspectiva sobre un plano	67
Figura 37. Escena a diferente escala.....	69
Figura 38. Imagen de prueba.....	70
Figura 39. Imagen rectificada, rejilla 4×10	71
Figura 40. Error de desviación en [cm] de puntos, rejilla 4×10	72
Figura 41. Efecto de la distorsión del lente sobre puntos ideales	72
Figura 42. Errores acumulados en [cm], rejilla 4×10.....	74
Figura 43. Efecto de compensación de error	75
Figura 44. Imagen rectificada, rejilla 7×7	76
Figura 45. Error de desviación en [cm] de puntos, rejilla 7×7	77
Figura 46. Errores acumulados en [cm], rejilla 7×7.....	77
Figura 47. Patrón geométrico y distorsión del lente	79

Figura 48. Imagen de prueba con supresión de distorsión radial.....	80
Figura 49. Imagen rectificada 4×10, con supresión de distorsión radial	81
Figura 50. Error de desviación en [cm] de puntos, con supresión de distorsión radial	82
Figura 51. Error acumulado en [cm], con supresión de distorsión radial	82
Figura 52. Elementos fuera de la plantilla, con distorsión radial	83
Figura 53. Elementos fuera de la plantilla, con supresión de distorsión radial.....	84
Figura 54. Imagen rectificada con rejilla 7*7, con supresión de distorsión radial. .	85
Figura 55. Error de desviación en [cm] de puntos, con supresión de distorsión radial, rejilla 7×7	85
Figura 56. Imagen virtual con distorsión perspectiva	86
Figura 57. Error de desviación en [cm] de puntos en imagen virtual	87
Figura 58. Mediciones repetidas sobre la imagen.....	89
Figura 59. Variaciones de los puntos seleccionados.	90
Figura 60. Variaciones de los puntos rectificados.....	91
Figura 61. Distorsión radial respecto a k.....	97
Figura 62. Ubicacion del espacio de salida para la figura 10.....	101

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Algoritmo de mapeo directo	30
Tabla 2. Algoritmo de mapeo inverso	32
Tabla 3. Algoritmo de localización de la línea en el infinito.....	40
Tabla 4. Comportamiento del error con y sin distorsión radial.	88
Tabla 5. Repetición de mediciones	89

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO 1	96
ANEXO 2	98

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de imágenes es hoy día una herramienta eficaz para trabajar en áreas como identificación, análisis y confrontación. Se ha convertido en un elemento forense indispensable en los procedimientos judiciales, garantizando un estudio y cotejo efectivo de pruebas que tienen valor en el ámbito legal. Ha resultado imprescindible en áreas forenses tan diversas como: la reconstrucción facial, la dactiloscopia, la telemetría, la balística, e indiscutiblemente jugando un papel importante en la fijación tanto del escenario como de la prueba, en el lugar de los hechos [1].

Entre más elementos se dispongan al elaborar un protocolo forense, mas éxito se tendrá a la hora de emitir juicios certeros; permitirán acelerar el proceso judicial en conjunto y que los veredictos generados estén acordes con las pruebas suministradas. Este es el escenario especial que se busca para la investigación de accidentes de tráfico. Donde permita obtener en su totalidad todos los elementos probatorios que esta representa, para ser analizada inmediatamente o a medida que el proceso judicial lo requiera. Por esta razón este trabajo tiene su punto base en el diseño, implementación y construcción de una herramienta digital para la extracción de la información planimétrica contenida en fotografías de accidentes de tránsito, que utiliza para rectificar la imagen los elementos de la misma escena o incluye elementos externos cuando se requiera.

El documento está estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 3 se hace un repaso de lo que representa el concepto de perspectiva en la historia del arte. Delimitando los antecedentes históricos, la representación clásica de una cámara y sus similitudes con modelo actual.

El capítulo 4 describe el modelo espacial utilizado para representar los puntos y rectas, que resulta fundamental para implementar y entender los algoritmos necesarios para la extracción de información en las imágenes.

El capítulo 5 describe las técnicas de tratamiento de imágenes que permiten generar las imágenes rectificadas de imágenes distorsionadas.

El capítulo 6 es el eje central del presente documento por que detalla el desarrollo metodológico que se planteó y que garantiza alcanzar los objetivos propuestos.

Los capítulos 7, 8 y 9 describen en su orden, los componentes de la interfaz como resultado del presente trabajo, los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta mediante la interfaz, y el proceso de validación que permitió concluir exitosamente los objetivos propuestos.

Finalmente, los capítulos finales 10 y 11, se enumeran los principales logros del trabajo realizados y se consignan algunas sugerencias que pueden complementar el trabajo en etapas futuras.

1 PRESENTACION DEL PROYECTO

1.1 TÍTULO

Extracción de información planimétrica a partir de fotografías, mediante tratamiento digital de imágenes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología basada en procesamiento digital de imágenes que permita recuperar información planimétrica de fotografías de accidentes de tránsito con fines forenses.

1.2.2 Objetivos específicos

-Implementar técnicas homográficas que permitan relacionar el plano de análisis con el plano de la imagen

-Desarrollar un método para extracción de características geométricas de huellas de frenado

-Implementar procedimientos de tratamiento digital de imágenes para relacionar los puntos sobre la plantilla de calibración y los puntos sobre la imagen.

2 JUSTIFICACIÓN

La fijación por medios fotográficos de la escena en accidentes de tránsito se ha venido adoptando, sobre todo por el tiempo reducido de permanencia en la escena, lo que conduce a periodos más cortos de interrupción del tráfico. Otra ventaja notable, además de ofrecer un expediente permanente de la escena 3D, es que permite extraer información métrica en cualquier momento. La información extraída de las huellas de frenado, que juega un papel importante en análisis forense del accidente, actualmente no cuenta con el tratamiento adecuado para su recolección y análisis y va en detrimento de un dictamen judicial certero.

La aplicación de técnicas homográficas para relacionar un plano en la escena con un plano en la imagen, garantizan que se pueda obtener información métrica entre los elementos que la conforman. Estas transformaciones no requieren conocer ningún parámetro interno, ni externo de la cámara fotográfica, lo cual permite que el procedimiento propuesto sea replicable a las imágenes digitales o analógicas que se encuentran archivadas en expedientes de accidentes de tránsito.

La composición de las escenas de accidentes de tránsito ofrece una distribución de elementos de los cuales es posible realizar el cálculo de las homografías; líneas paralelas, ángulos conocidos y/o marcas naturales. Por otro lado, las huellas de frenado permiten superponer sobre ellas marcar artificiales con el fin de garantizar mayor precisión en la extracción de información métrica. Finalmente, el trabajo desarrollado permitirá realizar labores en otros campos dentro del ámbito forense, aquellos en los cuales la información vital se encuentre contenida sobre un plano de configuración conocida o estimable geoméricamente.

3 GEOMETRÍA PROYECTIVA

Una cámara no es más que un artefacto geométrico que permite reproducir en imágenes planas el espacio 3D, mediante una proyección. Los primeros intentos de aprovechar las propiedades geométricas en la formación de una imagen datan del renacimiento, donde influyó tanto en su pintura como en su arquitectura. Tiempo después con la invención y posterior desarrollo de la fotografía, surgió el interés de utilizar la información contenida en las imágenes para hacer mediciones. Esos fueron los inicios de lo que hoy se conoce como fotogrametría. Al mismo tiempo, algunos estudiosos modelaban las proyecciones y el proceso de formación de las imágenes, con el objeto de entender matemáticamente conceptos como el punto de fuga y la distancia focal.

Este es el marco de referencia que será utilizado durante el presente documento, porque permite entender el proceso proyección geométrica en una imagen junto con los efectos que tiene sobre los elementos que componen la escena 3D. Para razonar mejor lo que ocurre durante la captura de una imagen digital, se introducirán los conceptos de geometría proyectiva y coordenadas homogéneas, que facilitan el estudio y comprensión del proceso de proyección.

Antes de empezar con el concepto de geometría proyectiva, es necesario entender las diferencias entre transformaciones y proyecciones. Las transformaciones son relaciones dentro del espacio n -dimensional, por ejemplo en movimiento de un punto en espacio 3D. Por otro lado, una proyección es una relación entre un espacio n -dimensional y un subespacio de dimensión menor, por ejemplo, la relación entre un punto 3D con un punto en un plano (en 2D).

Existen dos tipos diferentes de proyección: La proyección ortográfica y la proyección perspectiva. En la proyección ortográfica, los efectos de la perspectiva no están presentes, objetos a gran distancia mantienen invariantes sus propiedades geométricas, que cuando se observan de cerca. Con la proyección perspectiva, los objetos lejanos aparecen más pequeños que lo normal y las líneas paralelas se intersectan en un punto finito.

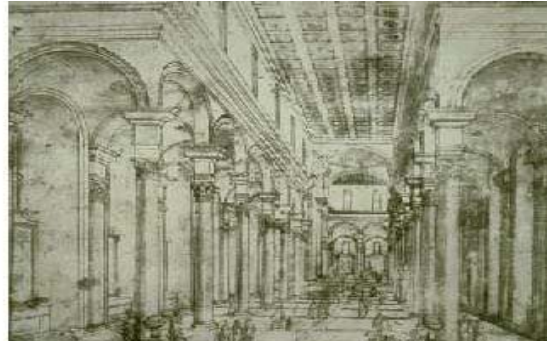
Debido a las consideraciones del modelo de la cámara con la que son capturadas las imágenes, en la presente tesis, solo el modelo de la proyección en perspectiva será tomado en cuenta.

3.1 GEOMETRÍA PROYECTIVA EN LA HISTORIA DEL ARTE

Los primeros en reconocer características geométricas en el medio circundante, fueron los griegos. Basados en sus conceptos pudieron medir las construcciones a partir de la sombra que proyectaban en el suelo. Sin embargo, estaban muy lejos de aportar a la teoría del modelo de visión actual, pues consideraban que la visión era activa, donde los ojos emitían partículas al mundo 3D en vez de considerar a los ojos como dispositivos pasivos receptores de luz.

Los siguientes en considerar los efectos de la perspectiva fueron los pintores del renacimiento, en esta época se empieza a considerar el *punto de fuga*, en el que líneas paralelas que se alejan del observador convergen en un punto. A manera ejemplo en la figura 1 se muestran dos pinturas: una pre-renacentista y otra renacentista. En la primera se puede observar la *polidimensionalidad*, en la cual los puntos de vista de los objetos representados no son únicos. En la segunda pintura se aprecia claramente la profundidad producida por las líneas que convergen en un punto de fuga. De esta manera el observador cree que está frente a una escena tridimensional.

Figura 1. Pintura pre-renacentista y renacentista.

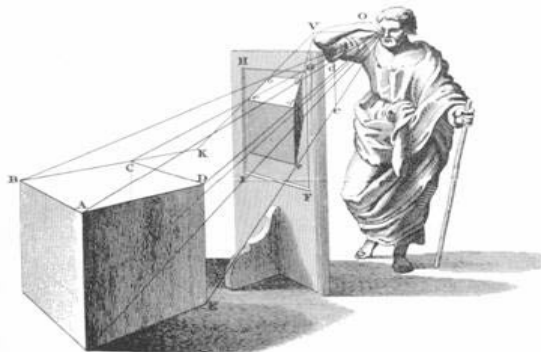


Fuente: [10].

En el siglo XVI se desarrolla la teoría de la perspectiva. Se introducen las *Máquinas de Perspectiva* para ayudar a los pintores a reproducir exactamente la perspectiva sin tener que hacer cálculos matemáticos.

3.1.1 La pirámide visual. Alberti usó la analogía de una pirámide visual para dar a entender la perspectiva. El describió la pirámide visual como “una figura de un cuerpo contorneada por líneas rectas hacia arriba, que termina en un solo punto. La base de esta pirámide es un plano, que representa la imagen observada. Los lados de la pirámide son esos rayos, que he llamado extrínsecos. La cúspide, es el punto de la pirámide, que está alineado con el ojo donde el ángulo...”(ver Figura 2).

Figura 2. Modelo de la pirámide visual



Fuente. [10]

Él definió una imagen de dos dimensiones como el plano secante a través de la pirámide visual. El pintor/observador está localizado al final de la pirámide. Al proyectar las líneas visuales en el plano de imagen, se consigue la proyección correcta de la perspectiva. De esta forma, una imagen con una perfecta perspectiva es una proyección lineal del objeto, en la base de la pirámide, sobre el plano de imagen.

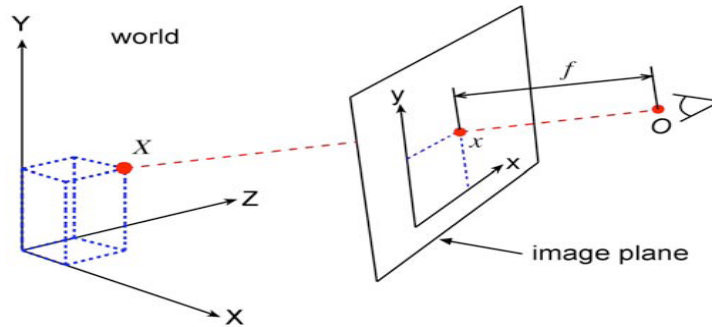
3.2 EL MODELO DE LA CÁMARA

Ahora que se conocen los principios básicos de la construcción de perspectiva en la historia del arte, es necesario hacerlo de manera práctica. En las mediciones a partir de una o varias vistas, el proceso de formación de la imagen puede ser modelado de una manera matemática. Esta sección describe el modelo de la cámara y el proceso proyectivo de la formación de la imagen.

3.2.1 Modelo de cámara pinhole (cámara oscura). El modelo de cámara pinhole es el más simple, y el modelo ideal de funcionamiento de una cámara. Este consiste en un hueco infinitesimal por donde entran los rayos de luz que posteriormente formaran una imagen invertida en la superficie posterior de donde se encuentra el agujero. La intersección de los rayos de luz con la superficie del objeto da lugar a la imagen del objeto. Para simplificar las cosas, usualmente se modela la cámara pinhole colocando el plano de la imagen entre el punto focal de la cámara y el objeto, de forma que la imagen no se invierta. Esto ocurre debido a que las líneas rectas pasan a través de un solo punto. Un modelo esquemático de la cámara pinhole se presenta en la figura 3.

Leonardo da Vinci y Albrecht Dürer fueron dos de los primeros pintores en usar el modelo de la cámara pinhole para realizar sus pinturas con una perspectiva correcta (ver figura 4). Izq). Perspectógrafo de Leonardo. Der) Máquina de perspectiva de Albrecht Dürer

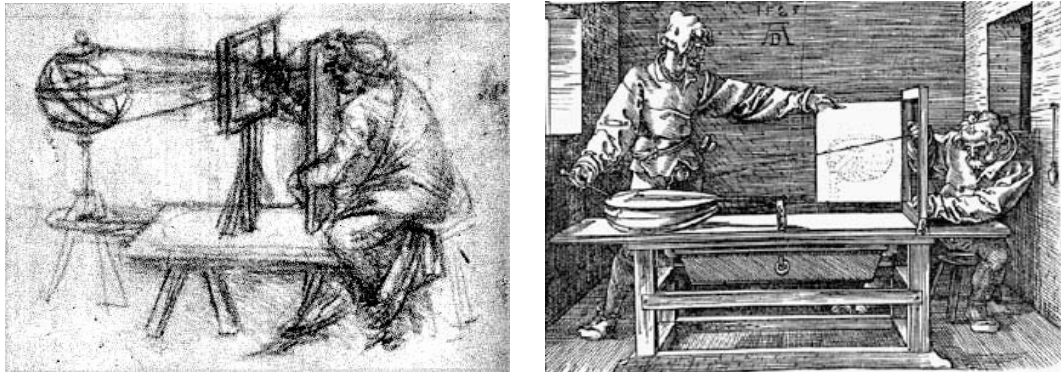
Figura 3. Modelo de cámara pinhole



Fuente. [10]

Cada uno utilizaba una manera singular para realizar las correcciones geométricas de sus pinturas.

Figura 4. Corrección de perspectiva



Fuente. [10]

3.3 PUNTOS Y LÍNEAS DE FUGA

Los puntos y líneas de fuga son elementos de la imagen que ofrecen información muy valiosa de la escena real. Aparecen en los sistemas ópticos como resultado de la deformación introducida por la perspectiva, y resultan fundamentales a la hora de estimar la dirección de las líneas y la orientación de los planos, en las imágenes. Dado que permiten ser estimadas directamente de la imagen sin ningún conocimiento explícito de la geometría relativa entre la cámara fotográfica y la

escena vista, son de gran ayuda para desarrollar los objetivos que se plantea este trabajo. Sin embargo, cuando están presentes generalmente ofrecen información visualmente confusa, como resultado de la reorganización de los elementos de la escena en la imagen, aun así, en el modelo geométrico que se utilizó esto no representa dificultad cuando se realizan los cálculos necesarios.

4 COORDENADAS HOMOGÉNEAS

Como es bien conocido, un punto en un plano puede representarse por un par de coordenadas (x, y) en \mathbb{R}^2 . Por otro lado, es común identificar como un plano a \mathbb{R}^2 . De ahora en adelante se considerará a \mathbb{R}^2 como un espacio vector, y al par coordenado (x, y) como un vector. El uso de esta notación permite que las transformaciones proyectivas sean tratadas algebraicamente como matrices. Introduciremos las coordenadas homogéneas con el fin de tratar de manera uniforme las transformaciones y representar el espacio de trabajo de forma matemática.

4.1 PUNTOS Y LÍNEAS

Las entidades geométricas se representan por definición como vectores columna. Un símbolo en negrilla como \mathbf{x} , siempre representa un vector columna, y su transpuesta es el vector fila \mathbf{x}^T . En acuerdo con esta convención, un punto en el plano será representado por un vector columna $(x, y)^T$, en lugar de su transpuesta, el vector fila (x, y) . En la expresión $\mathbf{x}=(x, y)^T$, ambos lados de la ecuación representan vectores columna.

4.1.1 Líneas homogéneas. La forma general de representar una línea recta en un plano coordenado es: $ax + by + c = 0$. En la convención actual, esta expresión se representa como $\mathbf{l}=(a, b, c)^T$, donde diferentes valores de a, b y c , simbolizan líneas distintas. De esta manera, una línea recta puede ser representada por un vector. Sin embargo, aunque los vectores $\mathbf{l}=(a, b, c)^T$,

$\mathbf{l}' = (ka, kb, kc)^T$ son distintos, representan líneas equivalentes para $k \neq 0$. Para corregir estos inconvenientes en la notación, los vectores \mathbf{l} y \mathbf{l}' se denotarán en adelante como *vectores homogéneos*.

4.1.2 Puntos homogéneos. Sea $\mathbf{x} = (x, y)^T$ un punto en la recta $\mathbf{l} = (a, b, c)^T$, luego tenemos que $ax + by + c = 0$. La expresión anterior puede representarse como $(x, y, 1)(a, b, c)^T = (x, y, 1)\mathbf{l} = 0$; Donde el punto $(x, y)^T$ está representado como un 3-Vector con coordenada final igual a 1. De igual manera, para cualquier $k \neq 0$ y línea \mathbf{l} , la ecuación $(kx, ky, k)\mathbf{l} = 0$ si y sólo si $(x, y, 1)\mathbf{l} = 0$. De esto se puede deducir que el conjunto de vectores $(kx, ky, k)^T \forall k \neq 0$, representa el punto $\mathbf{x} = (x, y)^T$ en \mathbb{R}^2 . Al igual que las líneas, los puntos también pueden representarse como *vectores homogéneos*.

4.1.3 Intersección de líneas. Sean $\mathbf{l} = (a, b, c)^T$ y $\mathbf{l}' = (a', b', c')^T$, dos líneas en el espacio coordenado y defínase al vector \mathbf{x} , como $\mathbf{x} = \mathbf{l} \times \mathbf{l}'$, donde \times representa el producto cruz. A partir de la identidad $\mathbf{l} \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{l}') = \mathbf{l}' \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{l}') = 0$, se observa que $\mathbf{l}^T \mathbf{x} = \mathbf{l}'^T \mathbf{x} = 0$. De esta forma, si \mathbf{x} se considera como la representación de un punto, entonces \mathbf{x} pertenece a juntas líneas \mathbf{l} y \mathbf{l}' , y por lo tanto es la intersección de las dos líneas.

4.1.4 Línea a través de puntos. Una expresión para la línea que pasa a través de dos puntos \mathbf{x} y \mathbf{x}' puede derivarse por un argumento similar al anterior. Definiendo una línea \mathbf{l} por $\mathbf{l} = \mathbf{x} \times \mathbf{x}'$, esto verifica que ambos puntos \mathbf{x} y \mathbf{x}' pertenecen a \mathbf{l} .

4.2 COORDENADAS HOMOGENAS ESPECIALES

4.2.1 Intersección de líneas paralelas. Considere las líneas paralelas $ax+by+c=0$ y $ax+by+c'=0$, representadas por los vectores $\mathbf{I}=(a,b,c)^T$ y $\mathbf{I}'=(a,b,c')^T$ en los cuales las dos primeras coordenadas son iguales. Dado que, la intersección de las líneas esta dada por $\mathbf{I} \times \mathbf{I}' = (c'-c)(b,-a,0)^T$ (3.1.3), si se ignora el factor de escala $(c-c')$, se tiene que la intersección de las líneas es el punto $(b,-a,0)^T$.

Si se desea encontrar la representación no-homogénea de este punto, se tiene $(b/0,-a/0)^T$, que no tiene sentido, excepto que indica que el punto tiene coordenadas infinitamente grandes. En general, puntos con coordenadas homogéneas $(x,y,0)^T$ no corresponden a ningún punto finito en \mathbb{R}^2 . Esta idea concuerda con la idea de que las líneas paralelas se encuentran en el infinito.

4.2.2 Puntos ideales y la línea en el infinito. Los vectores homogéneos $\mathbf{x}=(x_1,x_2,x_3)^T$ tales que $x_3 \neq 0$ corresponden a puntos finitos en \mathbb{R}^2 . Una manera de aumentar \mathbb{R}^2 es aumentar puntos cuya coordenada $x_3=0$. El espacio resultante es el conjunto de todos los 3-vectores homogéneos, llamado el espacio proyectivo P^2 . Los puntos con la última coordenada $x_3=0$ son conocidos como *puntos ideales*, o puntos en el infinito. El conjunto de puntos ideales puede escribirse de la forma $(x_1,x_2,0)^T$. Además, este conjunto pertenece a una sola línea, la *línea en el infinito*, denotado por el vector $\mathbf{I}_\infty=(0,0,1)^T$. De hecho, es posible verificar que $(0,0,1)(x_1,x_2,0)^T=0$.

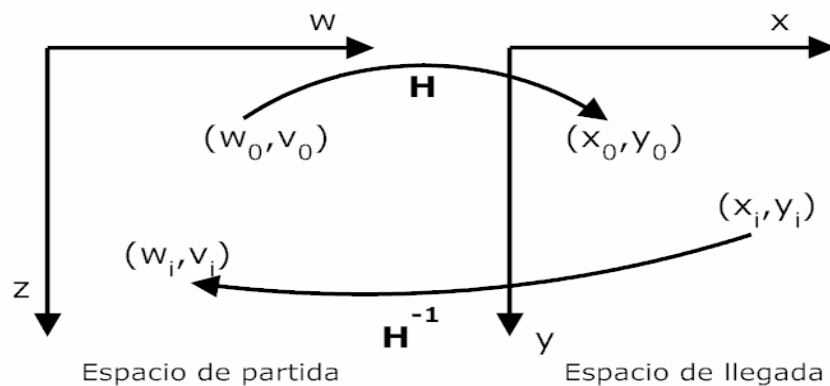
Nótese como la introducción del concepto de puntos en el infinito ayuda a simplificar las propiedades de intersección de puntos y líneas. En el plano

proyectivo \mathbb{P}^2 , se puede decir, a grandes rasgos, que dos líneas distintas se juntan en un simple punto y dos puntos distintos caen sobre una simple línea. Esto no es cierto en la geometría euclidiana de \mathbb{R}^2 , en el cual las líneas paralelas son un caso especial.

5 TRANSFORMACIONES ESPACIALES.

Las transformaciones espaciales son relaciones entre pares de puntos, aplicadas sobre espacios coordenados, que permiten referir duplas de un conjunto a otro de coordenadas. En el procesamiento digital de imágenes, la forma mas común de encontrar estas transformaciones es en escalados, rotaciones y translaciones o como la composición de cualesquiera de ellas.

Figura 5. Transformación espacial



Fuente: Autor

De manera general, una transformación espacial relaciona espacios coordenados (w, z) y (x, y) , mediante un operador $H\{\}$. Estos espacios coordenados se conocen como el espacio de partida y el espacio de llegada, respectivamente. El operador $H\{\}$, es una relación general definida entre los espacios, que permite corresponder las coordenadas entre sus puntos.

En nuestro caso, el espacio de partida está compuesto por una imagen digital de dimensión $M \times N$ píxeles, que corresponde a un detalle del espacio 3D

distorsionado por efecto de la perspectiva. El espacio de llegada correspondería a una imagen de $M' \times N'$ del detalle 3D sin distorsión (idealmente). Se supone la existencia de por lo menos una relación (Homografía) entre los dos espacios coordenados, que permite ser reconstruida a partir de las imágenes capturadas. Las transformaciones proyectivas, son el tipo de relaciones que nos permiten interactuar entre las dos imágenes o espacios coordenados, y de las cuales la presente tesis tomará el mayor partido.

Los ejes coordenados de los espacios de partida y llegada, se denotan como aparecen en la Figura 5, para que coincidan con los utilizados en procesamiento digital de imágenes.

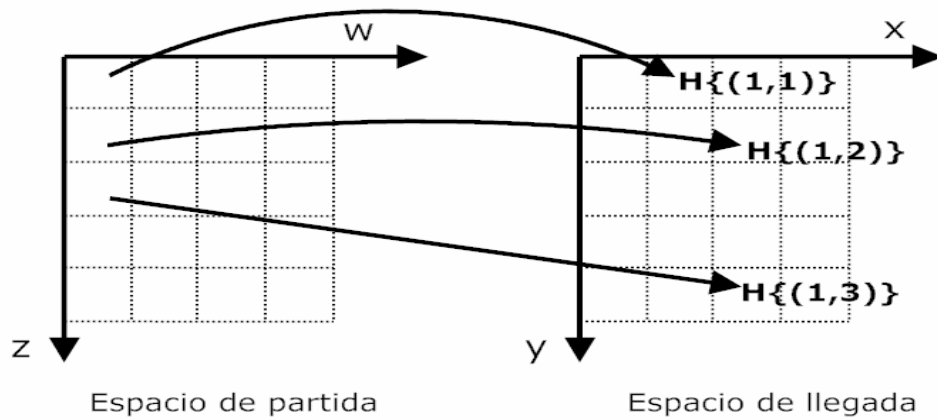
5.1 MAPEO DIRECTO

Una vez definida la transformación espacial entre los espacios de partida y llegada, es necesario obtener una representación de la imagen sin distorsión en el espacio de llegada. La forma más común de obtener esta imagen, es aplicando la transformación espacial sobre cada uno de los píxeles de la imagen de partida así:

Tabla 1. Algoritmo de mapeo directo

Algoritmo de mapeo directo
*-Ubicarse sobre cada píxel (w_k, z_k) en el espacio de partida.
*-Localizar el punto (x_k, y_k) sobre el espacio de llegada, mediante la expresión $(x_k, y_k) = H \{(w_k, z_k)\}$
*-Ubicarse sobre el píxel (x_k, y_k) en el espacio de llegada.
*-Copiar el valor del píxel del espacio de partida al espacio de llegada.

Figura 6. Mapeo directo



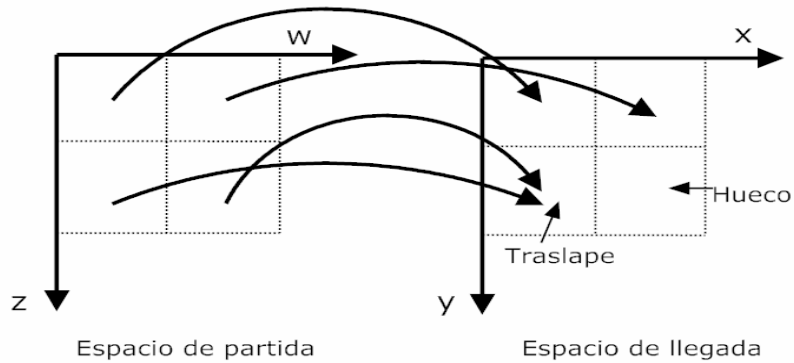
Fuente: Autor

La Figura 6 muestra la aplicación del mapeo directo sobre los espacios coordenados. A cada elemento del espacio de partida se le aplica la transformación espacial que le haga corresponder con su compañero en el espacio de llegada.

Sin embargo, aplicar este procedimiento puede devolver dos inconvenientes. Primero, es posible encontrar ubicaciones (x_k, y_k) en el espacio de llegada que no reciba ningún píxel del espacio de partida. Segundo, que un punto (x_k, y_k) reciba valores de más de un píxel del espacio de partida. Por este motivo, se aplica a la par de la transformación espacial un procedimiento de interpolación que resuelve los inconvenientes de estos huecos y traslapes.

La Figura 7 muestran el caso especial donde se presentan huecos y traslapes en la imagen resultante, en el espacio de llegada. Esto ocurre debido a cada celda del espacio de partida y de llegada, se representa con una coordenada entera, de acuerdo como se haría con cada píxel de una imagen. Al aplicar la transformación espacial se encuentran entonces, ubicaciones que no corresponden a coordenadas enteras lo que trae como consecuencias dichos inconvenientes.

Figura 7. Huecos y traslapes



Fuente: Autor

5.2 MAPEO INVERSO

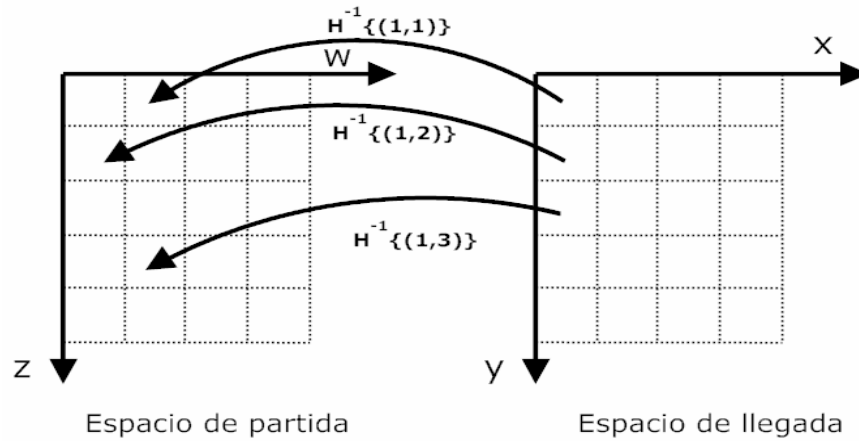
Otra manera de obtener la representación de la imagen en el espacio de llegada, que soluciona los problemas de agujeros y traslapes, es mediante el mapeo inverso (Figura 8). En este caso, se inicia la transformación ubicándose sobre el espacio de llegada, siempre sobre valores enteros, coincidiendo con la representación común de una imagen digital. Los valores de los píxeles (x_k, y_k) se calculan copiando los valores en el espacio de partida, siguiendo el procedimiento:

Tabla 2. Algoritmo de mapeo inverso

Algoritmo de mapeo inverso

- *-Aplicar la transformación inversa para localizar el valor (w_k, z_k) , mediante la expresión $(w_k, z_k) = T^{-1}\{(x_k, y_k)\}$, en el espacio de salida.
 - *-Usar los valores más cercanos a (w_k, z_k) , para interpolar una aproximación al valor del píxel en (w_k, z_k) .
 - *-Usar el valor anterior para asignarlo al píxel ubicado en (x_k, y_k) .
-

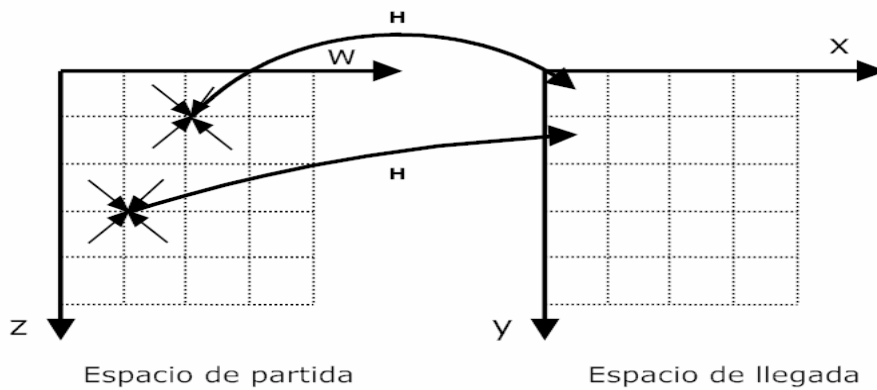
Figura 8. Mapeo inverso



Fuente: Autor

Aunque el procedimiento anterior soluciona el problema de los huecos y traslapes, también tiene sus inconvenientes a la hora de la implementación. El problema más recurrente, sucede cuando la transformación espacial no tiene una relación inversa identificable. En este caso, se utiliza la transformación para estimar los valores no-enteros del espacio de partida que tiene como salida valores enteros en el espacio de llegada. La Figura 9 muestra el proceso alternativo que se sigue cuando se desconoce la transformación inversa. Los valores de luminosidad del espacio de partida se escogen teniendo en cuenta a sus vecinos más próximos.

Figura 9. Mapeo indirecto



Fuente: Autor

6 DESARROLLO

En el capítulo 1 se repasó brevemente, como a lo largo del tiempo, el hombre ha descrito de manera exitosa ciertas características de su entorno en representaciones pictóricas, generando para ello, modelos matemáticos que ayudan a explicarlas mejor. Condensando así, efectos y fenómenos ópticos de escenas reales en planos fotográficos.

Lo que se pretende ahora es develar de estos planos fotográficos algunos detalles importantes, mas precisamente, detalles métricos entre los elementos que componen la escena real. Para lograr esto, los modelos matemáticos tratados en el capítulo 4, junto a las técnicas de tratamiento de imágenes comentadas en el capítulo 5, abren un techo por donde se puede extraer dicha información. Se busca un nuevo modelo matemático que invierta la labor que se lleva acabo, en este caso, no por el pintor, sino por una cámara fotográfica.

Se vio en el capítulo 3, que es posible relacionar matemáticamente dos planos de imagen, y ver representados lo comportamientos de uno, en características métricas en el otro. Que dichas transformación son posibles y se conocen como homografías. Solo queda por plantear nuestro propio modelo, donde una superficie plana (vía, andén, fachada) contenida en una imagen se relacione con una vista de la misma paralelamente, es decir, con su orto-imagen.

La técnica propuesta consiste entonces, en ubicar en la escena un polígono distorsionado de dimensiones conocidas para calcular, mediante homografías, una imagen no distorsionada y consecuentemente poder realizar mediciones sobre ella de manera optima. En el presente capítulo se detalla de manera secuencial el proceso que garantiza que esto sea posible.

6.1 LAS IMÁGENES UTILIZADAS

Las imágenes corresponden a fotografías de planos que por consecuencia de la perspectiva no mantienen invariantes todas* sus propiedades métricas. El efecto de la perspectiva surge como resultado del funcionamiento mismo de la cámara que captura las imágenes, y es la forma más común de encontrar representada la profundidad en una fotografía (Figura 10). La captura de la imagen introduce los efectos no deseados de la perspectiva junto con otra variedad efectos distorsionantes**, sin embargo, condensa en un solo plano gran cantidad de información métrica de la escena fotografiada.

Figura 10. Imagen de referencia



Fuente: Autor

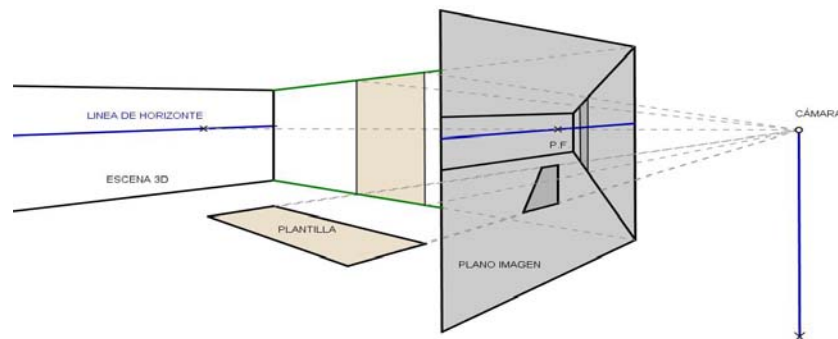
*- Los elementos invariantes dependen del tipo de proyección que se realiza en la imagen. En este caso, se puede hablar de invariantes para afinidades, simetrías y proyectividades.

** - Existen distorsiones que se presentan en la imagen independientemente de defectos de fabricación en los dispositivos, y que no se tienen en cuenta en el presente trabajo. (ver anexo 1)

El efecto más común de la perspectiva sobre un plano y del que mayor uso hará la presente tesis, es que no se preserva el paralelismo en las escenas capturadas. Cuando las líneas paralelas presentes en una escena son capturadas por la cámara, su representación cambia y se presentan interceptadas en un punto. Éste punto de intersección se conoce como el *Punto de Fuga*. En la mayoría de las escenas fotografiadas se pueden identificar con precisión al menos un punto de fuga, siempre y cuando, existan elementos paralelos en la escena real.

Deshacer el efecto, en la imagen, que produce la cámara sobre las líneas paralelas, equivale en nuestro caso a recuperar las propiedades métricas de la escena. Luego, el primer paso para conseguirlo es conocer el tipo de distorsión que ocurre sobre las imágenes e implementar un modelo matemático que invierta la distorsión.

Figura 11. Formación de la imagen



Fuente: Autor

La Figura 11 muestra el proceso de formación de la imagen en la cámara, las líneas paralelas en la escena convergen siempre en un punto de fuga que se encuentra situado sobre la línea del horizonte. Esta línea como los correspondientes puntos de fuga se localizan con relativa facilidad a partir de los elementos de la escena.

En la mayoría de los casos la información contenida en la escena no es suficiente para deshacer la distorsión, para lo cual se hace necesario introducir un elemento a la escena del que se conozcan sus propiedades geométricas. Se escogió para este caso como *plantilla de calibración* un tapete, que permite diferenciarlo de otros elementos, de dimensiones conocidas, que admite estimar el efecto de la perspectiva sobre un cuadrado y también definir los puntos de fuga sobre la escena capturada.

Figura 12. Plantilla de calibración

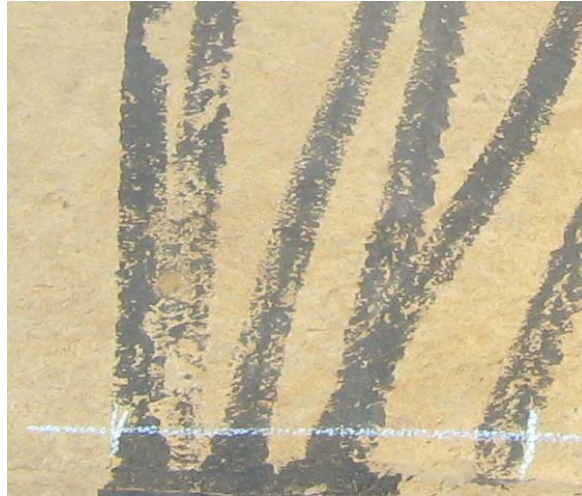


Fuente: Autor

Dado que los puntos de interés se obtienen directamente de la imagen distorsionada, en aquellos casos donde no sea eficiente o posible diferenciarlos en la escena, también se puede hacer uso de marcadores de su posición. Esto ayudaría a separarlos de otros, que debido a la escena tiene los mismos valores de intensidad en la imagen, o que dependen de la resolución de la imagen digital.

La Figura 13 muestra un detalle de la figura 12, donde las marcas sobre la escena, ayudan a diferenciar los elementos importantes y agilizan los posteriores procesos de medición.

Figura 13. Marcas sobre la escena



Fuente: Autor

6.2 SELECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

La estimación matemática de la distorsión se ha presentado de dos maneras diferentes. Primero, se localiza la transformación inversa que devuelve la geometría correcta a la plantilla contenida en la escena capturada. Segundo, mucho más complejo, se devuelve la intersección de las líneas paralelas (*puntos de fuga*) a su ubicación real en el infinito y se asigna el valor real a los ángulos o a los segmentos identificados.

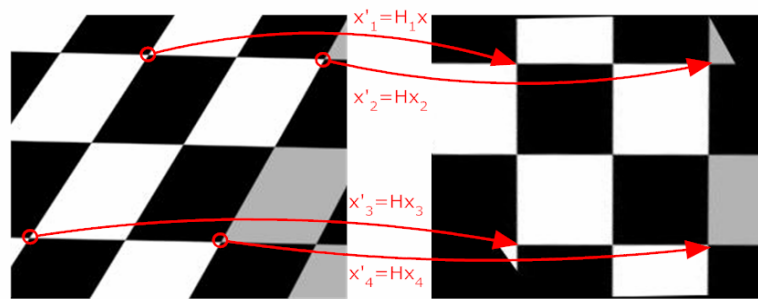
6.3 PUNTOS ESQUINA

Los puntos esquina de la plantilla de calibración se utilizan para establecer una relación con sus correspondientes ideales en la imagen rectificadas. Aquí juega un papel importante la plantilla de calibración. Ésta se ha escogido como un tapete cuadrado, lo que permite conocer siempre sus características independientemente

de la complejidad de la escena, y suponer de antemano que la imagen rectificadas contendrá al menos un cuadrado.

Lo que garantiza que al menos estos 4 puntos (las esquinas de la plantilla de calibración) hagan parte de la transformación inversa que rectifica la imagen.

Figura 14. Puntos esquina



Fuente: Autor

La Figura 14 muestra la ubicación de estos puntos en el plano rectificadas. Una vez se haya calculado la transformación que invierte la distorsión, se podrán conocer la ubicación espacial de todos los $m \times n$ puntos de la imagen.

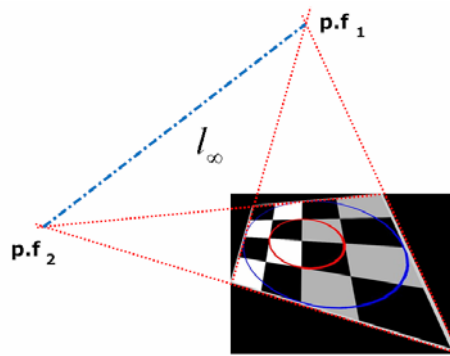
6.4 PUNTOS DE FUGA

La localización de las líneas paralelas y la consecución de los puntos de fuga, se realiza eficientemente si se trabajan, puntos y líneas, como coordenadas homogéneas. Esto permite simplificar el proceso de selección de las líneas paralelas de la escena. Para identificar una línea en nuestra escena se escogen dos puntos $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ y $\mathbf{y} = (x'_1, x'_2, x'_3)^T$ sobre un lado de la plantilla de calibración. La relación $\mathbf{l} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$ (véase 2.1.4) determina las coordenadas de dicha línea. Este proceso se sigue hasta identificar dos pares de líneas paralelas,

dirigidas a puntos de fuga distintos. Un punto de fuga se localiza mediante la expresión $\mathbf{p.f} = \mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2$ (véase 2.1.3).

Una vez se disponga de los dos puntos de fuga, el paso siguiente es localizar la línea en el infinito o línea de horizonte, que es la línea que se tiende entre los dos puntos de fuga. Esta situación se resuelve consecuentemente mediante la relación $\mathbf{l}_\infty = \mathbf{p.f}_1 \times \mathbf{p.f}_2$.

Figura 15. Línea en el horizonte



Fuente: Autor

El proceso general que se sigue es:

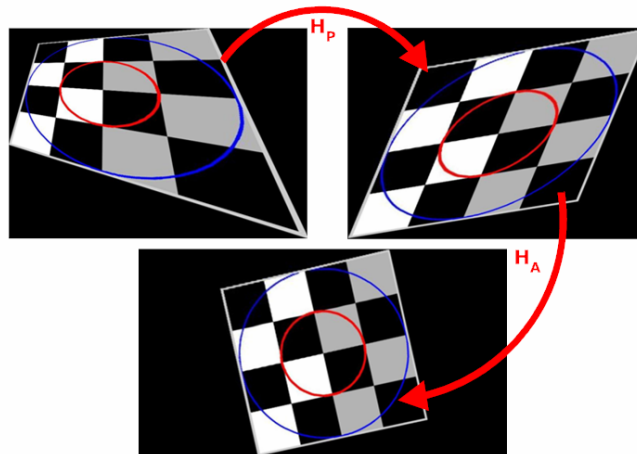
Tabla 3. Algoritmo de localización de la línea en el infinito

Algoritmo de localización de \mathbf{l}_∞
*-Se ubican dos puntos sobre un mismo lado de la plantilla de calibración.
*-Se obtiene la línea \mathbf{l}_1 a partir de dichos puntos.
*-Se ubican dos puntos en el lado opuesto de la plantilla de calibración.
*-Se obtiene la línea \mathbf{l}_2 de dichos puntos.
*-Se repiten los pasos 1 a 4, en los otros dos lados de la plantilla de calibración.
*-Se calculan los puntos de fuga, $\mathbf{p.f}_1 = \mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2$, $\mathbf{p.f}_2 = \mathbf{l}_3 \times \mathbf{l}_4$
*-Se calcula la línea de horizonte, $\mathbf{l}_\infty = \mathbf{p.f}_1 \times \mathbf{p.f}_2$

Esta línea de horizonte $\mathbf{l}_\infty = (l_1, l_2, l_3)^T$, contiene la información suficiente para devolver al paralelaje las aristas opuestas de la plantilla de rectificación. Sin embargo, aunque las líneas paralelas en la escena ya lo son también en la imagen, todavía no se recuperan las propiedades métricas de la escena. Para lo cual, habrá que tomar partido, de ángulos y relaciones conocidas para conseguir la rectificación métrica.

En este orden, las transformaciones que se aplican sobre la imagen distorsionada para devolverle sus características métricas serían; primero una transformación proyectiva H_p que devuelve el paralelaje y luego se aplica una transformación afín H_A , que devuelve la métrica, la imagen resultante dista de la ideal (rectificada) solamente por el factor de escala.

Figura 16. Rectificación a partir de puntos de fuga



Fuente: Autor

La Figura 16 muestra el proceso de rectificación cuando se utilizan los puntos de fuga y las relaciones conocidas de la escena.

6.5 RECTIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES

La información contenida en la plantilla de calibración, que se adiciona a las escenas, es la que permite transformar a la vista ortogonal la imagen del plano capturado. Para ello se siguen los procedimientos mencionados en los numerales 4.3 y 4.4, para calcular la matriz de transformación H .

Aunque la homografía H permite comprobar que las líneas rectas presentes en la escena se mantienen rectas en la imagen, sin embargo, bajo las consideraciones no-ideales de operación de los lentes fotográficos, dichas líneas no siempre se corresponden con líneas rectas en la imagen, debido a los efectos de distorsión introducidos al capturar las escenas. En el presente documento no se tienen en cuenta ningún tipo de distorsiones causadas en el dispositivo fotográfico. Dejando como extensión a trabajos futuros, la restitución de la distorsión radial del lente.

En este sentido, el proceso de rectificación se plantea matemáticamente de acuerdo a los siguientes procedimientos.

6.6 RESOLUCIÓN MATRICIAL DE H

Bajo la proyección ideal de una cámara pinhole, un punto en un plano de coordenadas reales X , se representa como x en las coordenadas de la imagen. De esta forma todos los puntos de la imagen, que representan un plano, se encuentran relacionados con sus respectivos pares en el plano real, siguiendo una expresión de la forma:

$$\bar{x} = H\bar{X}$$

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \vec{X} \quad (1)$$

Mediante propiedades del producto cruz(\times) y de análisis matricial la ecuación 1 puede de desarrollarse de la siguiente forma:

$$\vec{x} \times H\vec{X} = \vec{0}$$

$$\begin{bmatrix} x_2(h_7X_1 + h_8X_2 + h_9X_3) - x_3(h_4X_1 + h_5X_2 + h_6X_3) \\ x_3(h_1X_1 + h_2X_2 + h_3X_3) - x_1(h_7X_1 + h_8X_2 + h_9X_3) \\ x_1(h_4X_1 + h_5X_2 + h_6X_3) - x_2(h_1X_1 + h_2X_2 + h_3X_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Que representa la ecuación 1 como un arreglo lineal en los coeficientes de H. Reordenando los términos obtenemos finalmente la expresión:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -x_3X_1 & -x_3X_2 & -x_3X_3 & x_2X_1 & x_2X_2 & x_2X_3 \\ x_3X_1 & x_3X_2 & x_3X_3 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -x_1X_2 & -x_1X_3 \\ -x_2X_1 & -x_2X_2 & -x_2X_3 & x_1X_1 & x_1X_2 & x_1X_3 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \\ h_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Que ofrece la posibilidad de calcular directamente H, si se conocen por lo menos 4 correspondencias entre puntos de la escena real X_i y puntos en la imagen x_i .

Una vez se conoce la transformación proyectiva H , la imagen es rectificadora de acuerdo a H^{-1} , y posteriormente se extrae toda la información planimétrica necesaria.

6.7 RESOLUCIÓN FRACCIONADA DE H

Como indicamos en 4.4, mediante la determinación de uno o más puntos de fuga y junto con la información ofrecida por elementos métricos directamente de la imagen, es posible deshacer los efectos de la perspectiva de un plano.

Si consideramos nuevamente la relación entre puntos del espacio real X , y puntos en la imagen capturada x , mediante la expresión $\vec{x} = H\vec{X}$, pero ahora consideremos la transformación proyectiva H como el producto de tres matrices, la expresión 1 se puede desarrollar como:

$$\begin{aligned}\vec{X} &= H^{-1}\vec{x} \\ &= (SAP)\vec{x}\end{aligned}\quad (3)$$

Que mantiene cada elemento como un 3-vector en su respectivo espacio coordinado. Las matrices que componen la transformación proyectiva inversa H^{-1} son en su orden: una matriz de similitud S , una matriz afín A y una proyección pura P .

Gracias a que las propiedades matriciales lo permiten, el efecto de la transformación H^{-1} se logra aplicando individualmente cada una de las tres matrices que la componen.

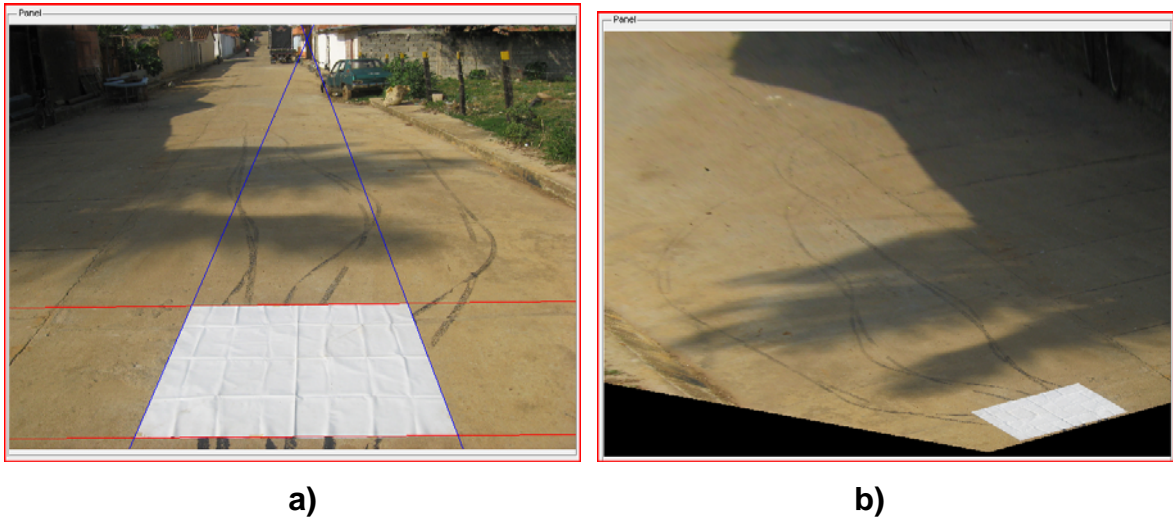
6.8 CÁLCULO DE LA TRANSFORMACIÓN PROYECTIVA P

La transformación P se calcula, a partir de la línea de fuga, mediante la expresión:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ l_1 & l_2 & l_3 \end{bmatrix}$$

Donde $l_\infty = (l_1 \ l_2 \ l_3)^T$ es la representación homogénea de la línea de fuga, calculada siguiendo los procedimientos indicados en la tabla 3.

Figura 17. Aplicación de la transformación proyectiva



Fuente: Autor

La figura 17 a) muestra el proceso de selección de los puntos de fuga en la imagen. La figura 17 b) muestra el resultado de aplicar la transformación proyectiva sobre la imagen distorsionada, teniendo en cuenta los límites de ubicación en el espacio de salida. Obsérvese que los elementos paralelos de la escena real, se presentan paralelos en la nueva imagen.

6.9 CÁLCULO DE LA TRANSFORMACIÓN AFÍN A

Para el cálculo de la transformación afín A, se utilizan los propios elementos geométricos de la escena y mediante instrumentos matemáticos se obtiene una representación para la matriz afín A.

6.9.1 Mediante ángulos rectos.

Dos ángulos rectos son suficientes para obtener la matriz afín A, debido a que un ángulo entre dos rectas permanece invariante frente a una transformación proyectiva. Una vez se conocen dos líneas ortogonales m' y l' , utilizando las expresiones:

$$\cos \theta = \frac{l'^T C' m'}{\sqrt{(l'^T C' l')(m'^T C' m')}} \\ C' = \begin{bmatrix} KK^T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

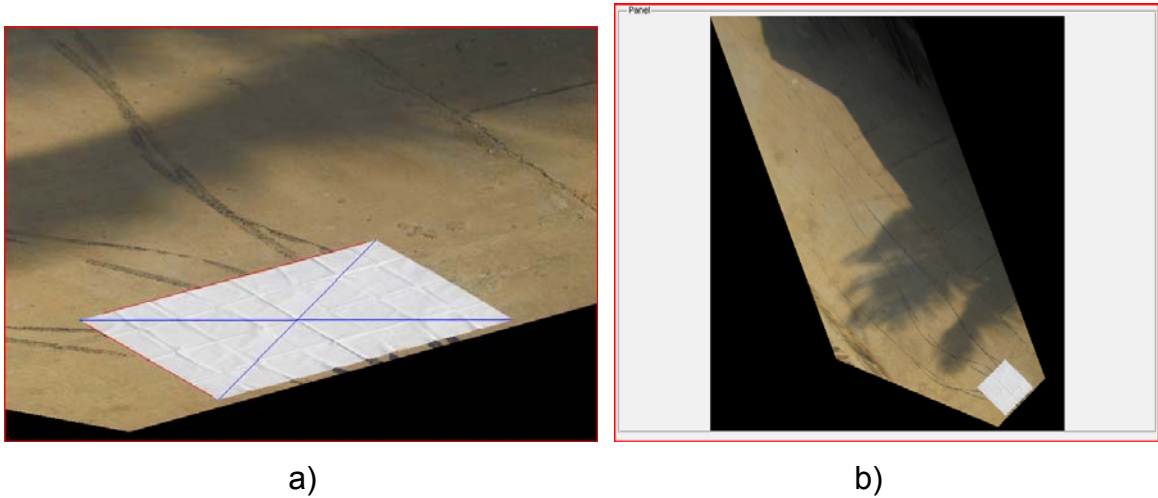
Se establece el sistema de ecuaciones:

$$(l'_1 m'_1, l'_1 m'_2 + l'_2 m'_1, l'_2 m'_2) \mathbf{s} = 0 \quad (4)$$

Donde $\mathbf{s} = (s_{11}, s_{12}, s_{22})^T$ es $S = KK^T$ escrito como un 3-vector. Solo son necesarias dos pares de líneas ortogonales para que 4 sea un sistema de dimensión 2×3 donde \mathbf{s} se calcula como el espacio nulo.

Para mayor profundidad en el tema puede referirse a [5]. Sección 2.7 donde se hace un análisis detallado para el proceso de rectificación mediante ángulos rectos.

Figura 18. Rectificación mediante ángulos rectos



Fuente: Autor

La figura 18 a) muestra la selección de los dos ángulos rectos sobre la plantilla de calibración. La figura 18 b) muestra la orto-imagen luego de aplicar la transformación A, sugerida siguiendo el planteamiento anterior.

La selección de los ángulos rectos no se debe limitar a la plantilla de calibración, también pueden usarse los elementos de la escena que tengan este tipo de propiedad.

6.9.2 Mediante ángulos iguales y longitudes conocidas.

Otra alternativa para hallar una expresión para la matriz afín A, es utilizando la información contenida en:

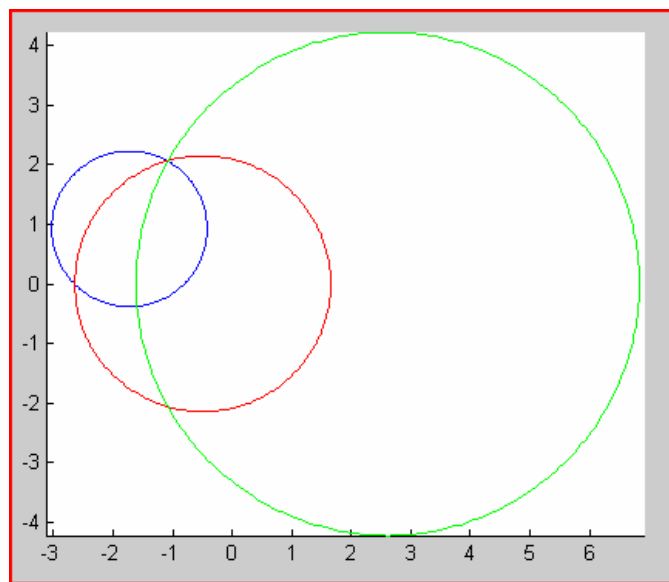
1. Un ángulo conocido entre dos líneas
2. Dos ángulos desconocidos entre líneas, y
3. Una razón de longitudes conocida

En cualquiera de los casos, la información se presenta como círculos en el plano complejo α y β . Donde la matriz afín A corresponde con la matriz:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & 0 \\ \beta & \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde los coeficientes α y β se estiman mediante los puntos circulares siguiendo las ecuaciones planteadas en [7].

Figura 19. Círculos en el plano complejo



Fuente: Autor

La figura 19, muestra la ubicación de los círculos característicos en el plano complejo α y β , cuando se escogen para analizar un ángulo conocido, dos ángulos desconocidos y una razón conocida.

Los valores de α y β se escogen como la intersección de todos los círculos descritos en el plano complejo y que correspondan a la intersección superior. Debido a esto, son necesarios por lo menos dos círculos en el plano complejo,

para que se pueda determinar los valores de α y β . Y no existe un número límite de extracción de características de la imagen distorsionada.

6.10 UBICACIÓN DE LA IMAGEN EN EL ESPACIO DE LLEGADA

Generalmente cuando se captura una escena mediante un dispositivo fotográfico, también se incluye en la imagen final, información no relevante, que no representa o contiene la información que deseamos manipular posteriormente. Un signo de que la imagen contiene información no apreciable, es cuando los puntos de fuga se encuentran ubicados muy cerca al plano de la imagen o están contenidos en él.

Figura 20. Puntos de fuga en la imagen



Fuente: Autor

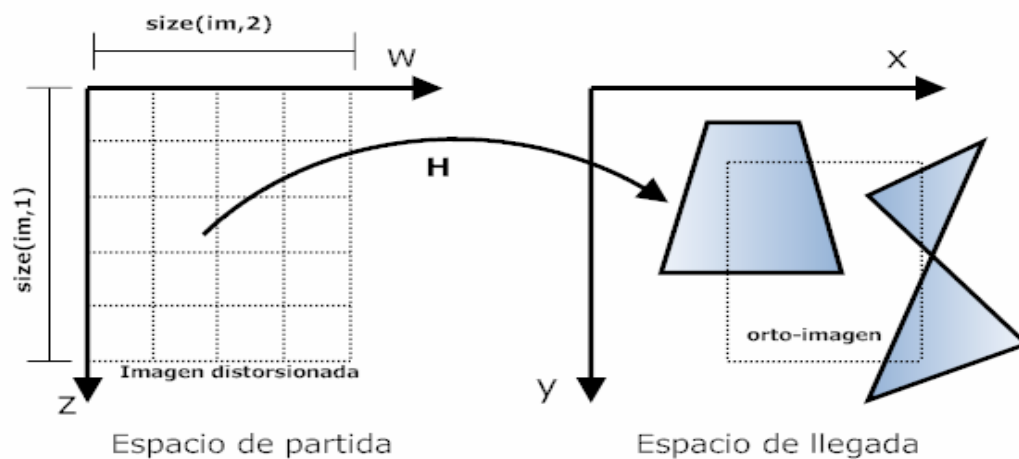
En la Figura 20 en detalle rojo, se pueden ver las áreas de la escena capturada que no tienen interés una vez se obtenga la orto-imagen.

Al procesar este tipo de imágenes, se presentan principalmente dos inconvenientes, el primero ocurre cuando la información fuera del plano ocupa un tiempo valioso de procesamiento y un espacio apreciable en la resolución final de la orto-imagen. El segundo, cuando el punto de fuga se encuentra directamente en

la imagen, lo que produce que la homografía se comporte erráticamente, y por ende la orto-imagen, cerca de los puntos de fuga.

Estos problemas son el resultado de la incertidumbre del espacio de llegada. De la imagen distorsionada en el espacio de partida, se conoce siempre la ubicación, la cual corresponde a $[0, \text{size}(\text{im}, 2)]$ y $[0, \text{size}(\text{im}, 1)]$, que vienen siendo el espacio rectangular (MxN) en píxeles que ocupa la imagen, cuando cada píxel en la imagen se toma como coordenada del espacio de partida. Sin embargo, de la orto-imagen en el espacio de llegada se desconocen tanto su forma como su ubicación.

Figura 21. Incertidumbre en el espacio de llegada



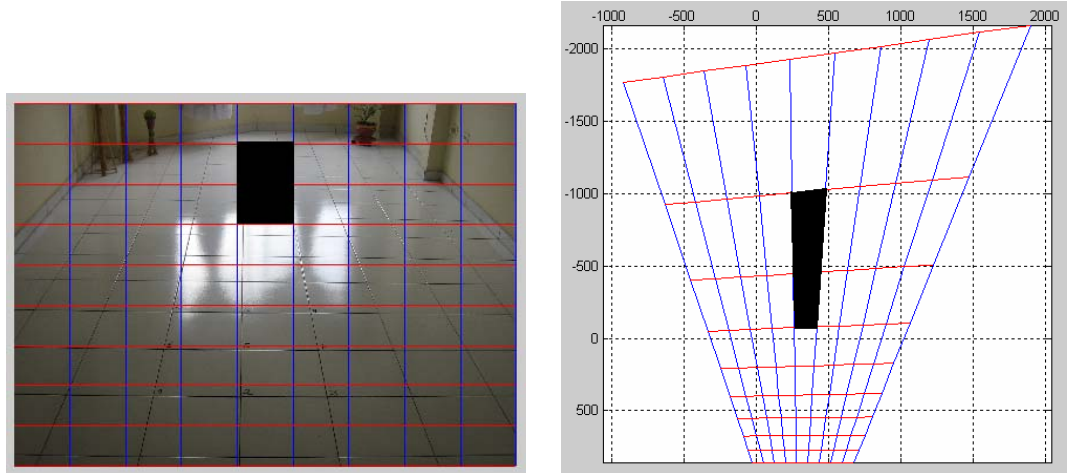
Fuente: Autor

La Figura 21 muestra la incertidumbre que se produce al momento de ubicar la imagen de salida (orto-imagen) en el espacio de llegada, pues se desconoce la forma como la ubicación de dicha imagen.

Para solucionar esta problemática, se analiza previamente la ubicación de una rejilla de igual tamaño que la imagen distorsionada, para obtener una estimación del espacio de llegada ocupado por la orto-imagen, sin que se requiera el

procesamiento completo de la imagen distorsionada, y el laborioso proceso de interpolación. Este análisis previo, agiliza el proceso de ubicación de los detalles en la imagen distorsionada, permitiendo enfocar el proceso de rectificación a estas áreas de interés.

Figura 22. Análisis previo de la transformación espacial



Fuente: Autor

La Figura 22, muestra los resultados ofrecidos por el análisis previo de la transformación espacial. Ofrece las coordenadas del espacio de salida donde se localiza la orto-imagen, permitiendo de esta forma localizar algunos detalles específicos de la misma.

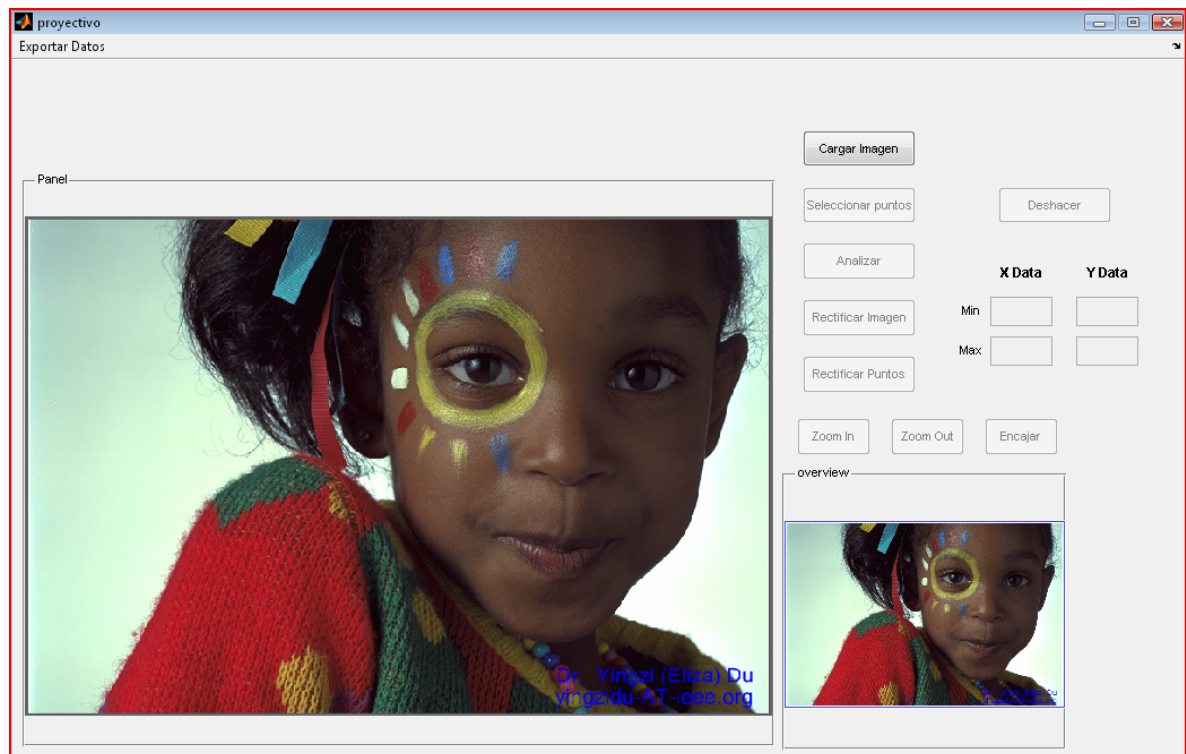
También permite conocer si la homografía calculada se comporta de manera adecuada con la transformación necesaria para devolver las propiedades métricas a la escena fotografiada. Esto último es de gran valor, al permitir hacerse una representación de cómo será la imagen rectificadas una vez se le aplique la homografía y si estará acorde con lo que se espera de la orto-imagen.

7 INTERFAZ GRÁFICA

Teniendo en cuenta todos los procedimientos seguidos en el capítulo 4, se ha programado una interfaz que cumple con todos los requerimientos necesarios para realizar el proceso de rectificación de imágenes y la posterior extracción de información planimétrica.

Durante el diseño de la interfaz, se siguieron las dos líneas fundamentales que se plantearon para realizar la rectificación, una para calcular la orto-imagen mediante los cuatro puntos esquina de la plantilla de calibración y otra para calcularla mediante la información contenida en los puntos de fuga.

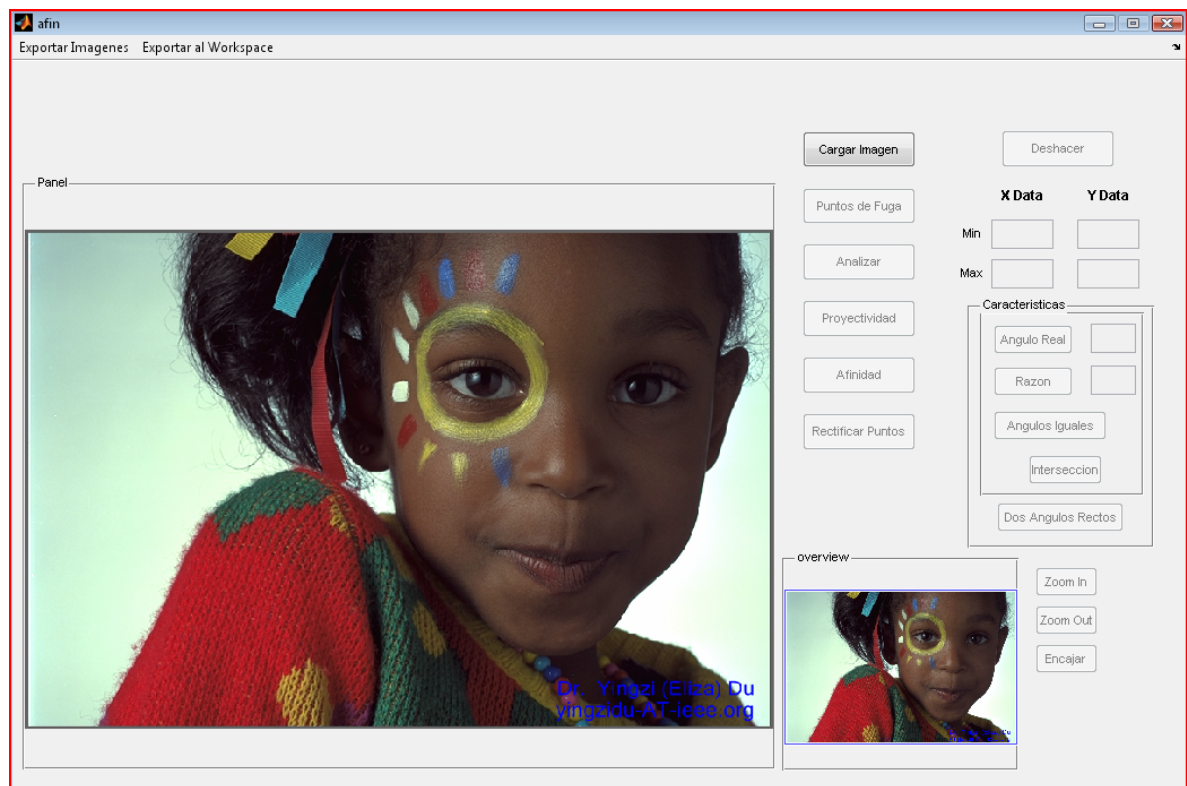
Figura 23. Módulo de rectificación a partir de cuatro puntos



Fuente: Autor

Existen dos módulos principales (figuras 23 y 24) diseñados para resolver cada una de las alternativas planteadas. Individualmente se distinguen en las características que se utilizan para calcular la matriz de transformación H . Aun así, comparten en diseño y funcionalidad gran parte de menús utilizados para adquirir, exportar, visualizar y analizar, tanto la imagen distorsionada como la rectificadas. A continuación se explican a grandes rasgos las funciones que cumplen cada uno de los elementos que la conforman.

Figura 24. Módulo de rectificación a partir de puntos de fuga e información métrica.

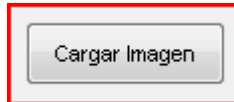


Fuente: Autor

7.1 ELEMENTOS COMPARTIDOS POR LOS MÓDULOS

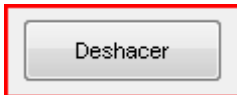
Los elementos que comparten los dos módulos diseñados son:

7.1.1 Botón Cargar imagen



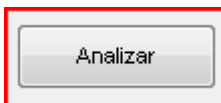
Es un elemento imprescindible en los dos módulos, debido que permite cargar a la interfaz la imagen distorsionada. La imagen se lee desde cualquier ubicación dentro del PC y debe corresponder a alguno de los siguientes tipos de archivo de imagen: *.jpg, *.gif, *.Tif, ó *.bmp.

7.1.2 Botón deshacer



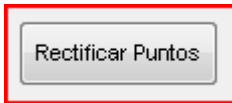
Permite deshacer tanto la rectificación completa de la imagen como cualquier paso intermedio, y llevarlo al estado inicial una vez se ha cargado la imagen distorsionada.

7.1.3 Botón analizar



Permite el análisis previo de la transformación espacial a realizar, condicionando el proceso de rectificación posterior. Está diseñado con los requerimientos enunciados en 4.10. Muestra la localización de la imagen rectificada en el espacio de llegada, si se tiene como entrada una rejilla de dimensión igual a la imagen distorsionada.

7.1.4 Botón rectificar puntos



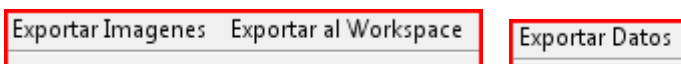
Permite extraer puntos directamente sobre la imagen rectificadora para realizar mediciones posteriormente.

7.1.5 Límites inferiores y superiores

	X Data	Y Data
Min	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Max	<input type="text"/>	<input type="text"/>

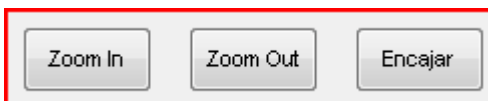
Permiten la entrada del usuario de las coordenadas donde se localiza la imagen rectificadora en el espacio de salida, o de las áreas de interés donde se desee obtener la rectificación. Los valores deben estar acordes con los ofrecidos en el proceso de análisis previo.

7.1.6 Menús de exportación de datos.



Permiten exportar los datos al workspace o a las carpetas del sistema, tanto de las transformaciones espaciales como de la imagen rectificadora.

7.1.7 Menús de navegación



Permiten acercar, alejar o encajar la imagen que se encuentra disponible en el panel principal.

7.1.8 Panel principal.

Es la sección de los módulos donde se muestran todas las imágenes resultantes de las transformaciones espaciales y que inicialmente se ocupa con la imagen distorsionada.

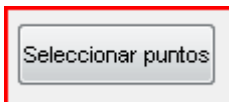
7.1.9 Overview.

Es la sección de los módulos ligada al panel principal que permite una navegación más rápida de la imagen actual que se tiene desplegada en el panel principal.

7.2 ELEMENTOS INDIVIDUALES DE CADA MÓDULO.

Los elementos individuales del módulo de rectificación a partir de cuatro puntos son:

7.2.1 Botón seleccionar puntos



Permiten al usuario seleccionar los puntos de la imagen que se encuentran en las esquinas de un cuadrado (plantilla de calibración). Se deben seleccionar por lo menos 4 puntos. Estos puntos son los que se utilizarán para obtener matricialmente una expresión para la homografía H .

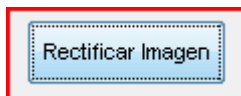
Los puntos se seleccionan siguiendo el patrón que se muestra en la figura 25, es decir, en sentido contrario a las manecillas del reloj empezando por la esquina inferior izquierda de la plantilla de calibración.

Figura 25. Selección de puntos



Fuente: Autor

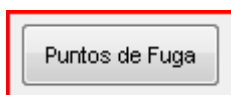
7.2.2 Botón Rectificar imagen



Permite al usuario continuar con el proceso de rectificación de la imagen distorsionada mediante la aplicación de la homografía H . Está sujeto a las condiciones iniciales que se dispongan como límites superiores e inferiores del espacio de llegada, en la área respectiva.

Los elementos individuales del módulo de rectificación a partir de los puntos de fuga son:

7.2.3 Botón Puntos de Fuga



Permite al usuario identificar dos pares de líneas paralelas, con el objeto de obtener la línea en el infinito, de acuerdo con los criterios enunciados en el numeral 4.4.

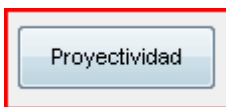
Las líneas paralelas se escogen de los lados opuestos de la plantilla de calibración, una tras otra, como aparecen en la figura 26.

Figura 26. Selección de puntos de fuga



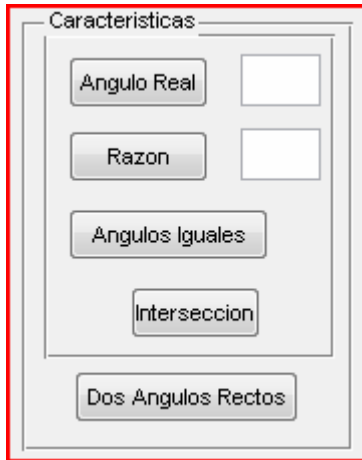
Fuente: Autor

7.2.4 Botón Proyectividad



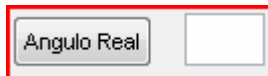
Permite al usuario aplicar la transformación proyectiva P a la imagen distorsionada que devuelve al paralelaje los elementos de la escena fotografiada que tienen esta propiedad, según los criterios enunciados en el numeral 4.4.

7.2.5 Área de selección de características



El área de selección de características integra toda la metodología propuesta en 4.7, para resolver de forma fraccionada la matriz de transformación afín A. De acuerdo con esto, ahí se encuentran las herramientas necesarias para obtener la información geométrica importante de la imagen distorsionada.

7.2.5.1 Botón Angulo real



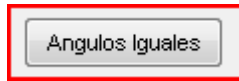
Permite ubicar un ángulo en la imagen, del que se conozca su apertura en grados. Para hacer esto, una vez se indique el valor del ángulo, se seleccionan el par de líneas que lo contienen, indicando por cada una dos puntos que la conformen.

7.2.5.2 Botón razón



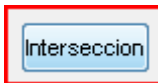
Permite seleccionar dos segmentos de líneas no paralelas, de los cuales se conozca la razón entre sus proporciones.

7.2.5.3 Botón Ángulos iguales



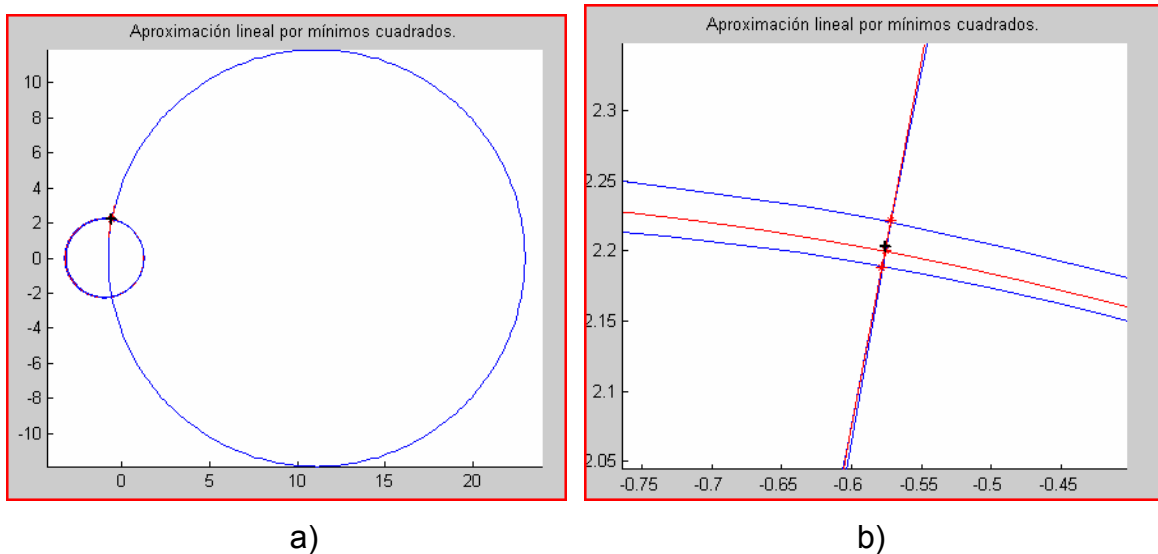
Permite que el usuario seleccione dos pares de líneas, cuyo ángulo entre ellas sea equivalente. Es indispensable que no exista paralelismo entre ninguna de las líneas seleccionadas para este procedimiento.

7.2.5.4 Botón Intersección



Como se mencionó en el numeral 4.9.2. Una vez se seleccionan las características métricas de la imagen, éstas se representan en el plano complejo α y β , como círculos. Este ítem permite calcular manualmente la intersección y estima una aproximación lineal cuando existen más de dos intersecciones entre los círculos.

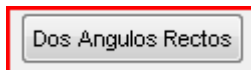
Figura 27. Selección manual de la intersección



Fuente: Autor

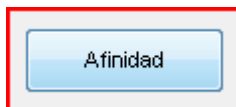
La figura 27 a) muestra los círculos en el plano complejo, en b) se observa en detalle las intersecciones que existen entre los círculos presentes en a), como el problema es netamente geométrico se escoge manualmente la mejor aproximación.

7.2.5.5 Botón Dos ángulos rectos



Permite al usuario seleccionar dos ángulos rectos en la imagen distorsionada, para calcular el valor de la transformación afín A . Los ángulos rectos deben estar marcados entre dos líneas, que en ningún momento deben ser paralelas entre si.

7.2.6 Botón afinidad



Permite al usuario aplicar la transformación afín A , calculada utilizando los recursos del área de selección de características. Devuelve las propiedades métricas a la imagen, salvo un factor de escala.

8 RESULTADOS

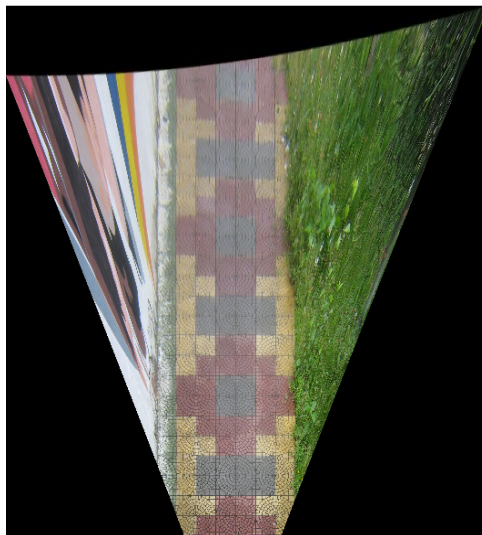
Estos son algunos de los resultados obtenidos siguiendo el procedimiento planteado en el capítulo 6 y que se lleva a cabo sobre la interfaz que se expone en el capítulo 7. Las imágenes corresponden patrones cuadriculados para agilizar los procedimientos de selección y rectificación, y de imágenes donde se ha introducido una plantilla de calibración.

Figura 28. Imagen distorsionada 1



Fuente: Autor

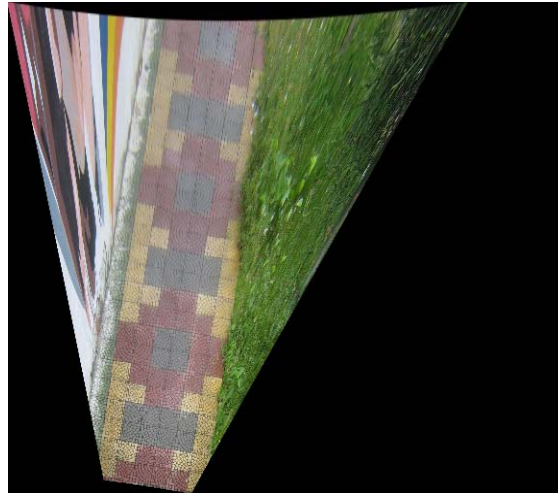
Figura 29. Imagen rectificada con rejilla 4 x12



Fuente: Autor

Como la imagen distorsionada, contiene los suficientes elementos métricos y además el punto de fuga continúa por fuera del plano de la imagen, no son necesarios ni la plantilla de calibración ni acotar el espacio de llegada.

Figura 30. Imagen rectificada mediante puntos de fuga y par de ángulos rectos



Fuente: Autor

Figura 31. Imagen rectificada mediante puntos de fuga, dos ángulos iguales y ángulo de 90°

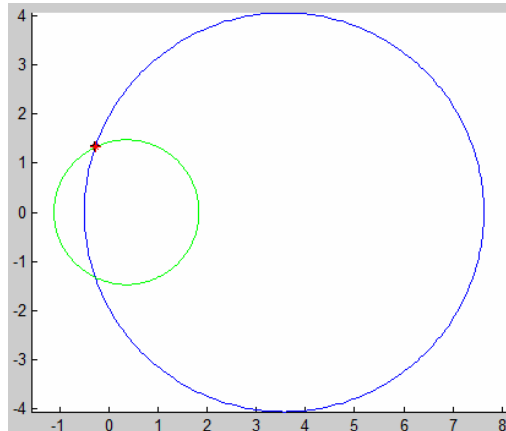


Fuente: Autor

Cuando se utilizan los puntos de fuga para rectificar una imagen, debido a los limitantes y al doble proceso de rectificación (Afinidad, Proyectividad) la imagen se reduce en su resolución lo que restringe el campo de aplicación a esas imágenes;

sin embargo en los casos donde la imagen no contiene el punto de fuga, el procedimiento produce imágenes que permiten un proceso de medición posterior.

Figura 32. Espacio geométrico α y β , ángulos iguales y ángulo conocido



Fuente: Autor

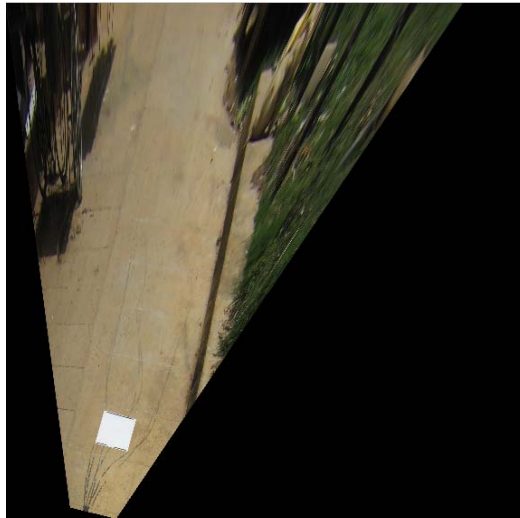
La figura 32 representa el espacio geométrico α y β donde se encuentra la representación circular para los elementos seleccionados; Dos ángulos iguales y Angulo conocido de 90° . (ver 6.9.2)

Figura 33. Imagen distorsionada 2



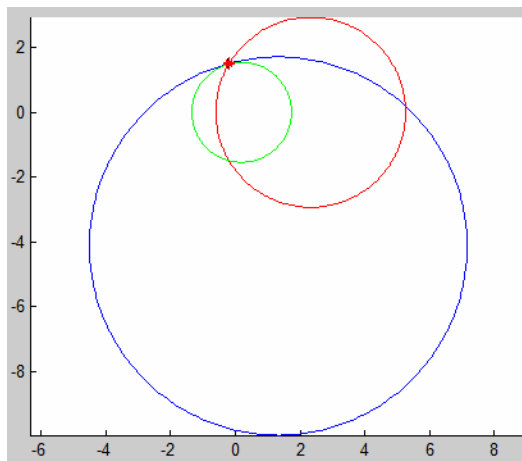
Fuente: Autor

Figura 34. imagen rectificada mediante puntos de fuga; dos ángulos iguales, ángulo conocido de 45° y razón de longitud = 1.



Fuente: Autor

Figura 35. Espacio geométrico α y β , dos ángulos iguales, ángulo conocido y razón de longitud



Fuente: Autor

La figura 35 muestra el espacio geométrico α y β donde se encuentra la representación circular para los elementos seleccionados; Dos ángulos iguales y Angulo conocido de 45° y razón de longitud 1, escogidos sobre la figura 33.

Generalmente la implementación con puntos de fuga, responde más adecuadamente a medida que se agregan elementos métricos.

Debido a la representación asintótica del modelo matemático como se representa la herramienta de la interfaz denominada razón de longitud, es imprescindible que siempre se acompañe como mínimo de dos de las otras herramientas de la interfaz denominadas ángulo real y ángulos iguales (ver 7.2.5).

En cualquiera de los procedimientos que se sigan para rectificar las imágenes, el tamaño de la plantilla de calibración juega un papel importante en la calidad de los resultados obtenidos. Luego, una metodología válida para reducir el error introducido por la distorsión radial, es aumentando en lo posible la plantilla de calibración para que cubra la mayor área posible de la escena capturada.

9 VALIDACIÓN

La validación del software consiste en aplicar los procedimientos descritos en 3 y 4, sobre una imagen bajo los efectos de la perspectiva figura 1. Para comprobar la precisión con que se realizan las mediciones, el sistema no se valida con fotografías de huellas de frenado, sino con imágenes que corresponden a pisos cuya composición (patrón de cuadrícula) permite utilizarla a la vez como plantilla de calibración y como herramienta de estimación de la distorsión radial en el lente. También porque dan la posibilidad de ubicar espacialmente la plantilla de calibración garantizando mejores resultados en las mediciones, evitando así cambiar de una imagen a otra a medida que la plantilla se traslada de lugar, debido a que al tamaño y la ubicación de la plantilla en la escena, está ligada directamente la precisión de las mediciones.

Figura 36. Distorsión de perspectiva sobre un plano



Fuente: Autor

Los resultados que se exploran son en su orden. La rectificación de una imagen digital sin compensar la distorsión del lente, luego se contrastan estos resultados con los que se obtienen en una imagen cuya distorsión del lente ha sido corregida, bien sea por una corrección directa en el sistema óptico (ver anexo 1) o como resultado de una corrección digital. Finalmente se diferencian con los que se obtienen cuando se utiliza una imagen virtual de un plano distorsionado por la perspectiva.

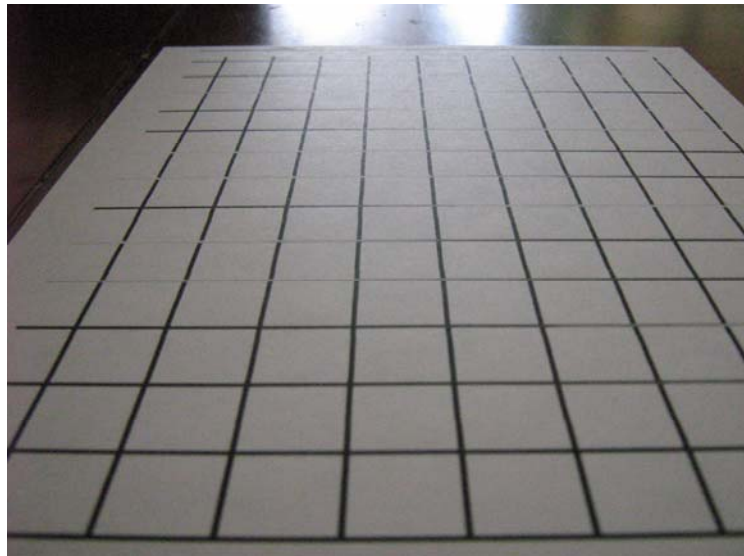
Debido a que las mediciones que se van a realizar están contenidas en un plano \mathbb{R}^2 , el análisis del error puede resultar ambiguo. Para evitar hablar individualmente de cada uno de los inconvenientes que se presentan, la validación de los resultados se hace teniendo en cuenta lo expuesto en el numeral (4.1), solo para determinar si el error hallado en la imagen está acorde con lo que se espera en este tipo de casos. Adicionalmente, se representa la distribución del error en la imagen rectificadas, como una imagen bidimensional donde el error se codifica con tonalidades de color.

Se analiza inicialmente la desviación de los puntos de interés de los puntos exactos sobre la figura, lo que permite conocer de antemano las áreas donde se producen mayores errores en la medición; además ofrece información de como influye la distorsión del lente en los resultados finales. Luego se considera el error total al realizar mediciones vertical u horizontalmente, para modelar el comportamiento de los resultados y la eficiencia al realizar mediciones por fuera de la plantilla de calibración. Finalmente se utilizan los resultados obtenidos con una imagen virtual para aproximar el error introducido al realizar las mediciones manualmente, junto con un análisis que ilustra la sensibilidad introducida en los resultados en las imágenes finales por la variabilidad natural de un usuario al seleccionar manualmente los puntos de la plantilla de calibración.

9.1 RECTIFICACIÓN DE IMAGEN EN PERSPECTIVA GENERAL

Dado que una imagen puede contener escenas planas con tamaños relativos con el orden de los 1 cm^2 hasta los 100 cm^2 , o más, gracias a los efectos introducidos por la perspectiva y el sistema óptico, los resultados que se aprecian a la escala de 1, son similares a los que se presentan a una escala mayor, salvo por los efectos de distorsión del lente.

Figura 37. Escena a diferente escala



Fuente: Autor

Las figuras 37 y 38 muestran como dos escenas de diferente escala (1.9 cm. por lado y 31.6 cm. por lado cada cuadrícula, respectivamente) son capturadas en imágenes de 2272×1704 píxeles c/u, esto indica que del comportamiento que se observe al rectificar una imagen de escala K, se podrá modelar el comportamiento de rectificar imágenes bien sea por encima o por debajo de dicha escala.

Por este motivo solo se analiza una escena en particular y se exponen los resultados que se obtienen al realizar las mediciones haciendo solamente variaciones en la plantilla de calibración.

Figura 38. Imagen de prueba



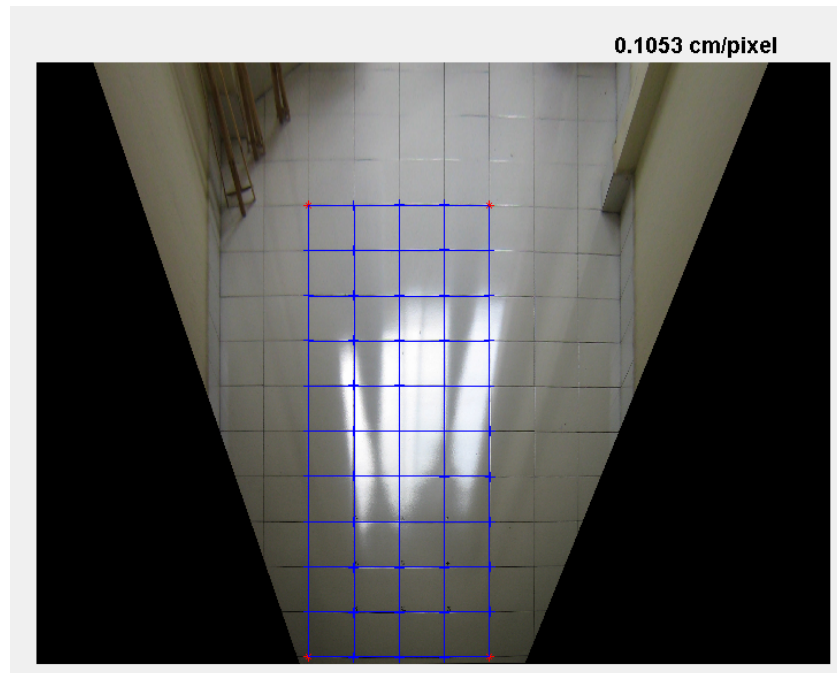
Fuente: Autor

Las figuras 38 y 39 muestran el conjunto imagen distorsionada e imagen rectificada, una vez se aplican los procedimientos descritos en los capítulos 3 y 4. La plantilla de calibración utilizada en este caso es la que se indica resaltada en la imagen rectificada (figura 39), que corresponde a una distribución de 4×10 pisos de 31.6cm c/u o $126.4 \times 316\text{cm}^2$, equivalente al 30% del área de interés, para una resolución final de la imagen rectificada de 0.1053 cm/píxel .

La rejilla (intersecciones entre pisos) que se presenta en la escena capturada, permite conocer de antemano la ubicación exacta de unos puntos de interés, y correlacionarlos con los que manualmente se identifiquen en la imagen rectificada.

La rejilla azul es una estimación de la posición que idealmente deberían tener los elementos de la escena, si se considera que los puntos esquinas de la plantilla de calibración están correctamente ubicados.

Figura 39. Imagen rectificada, rejilla 4x10

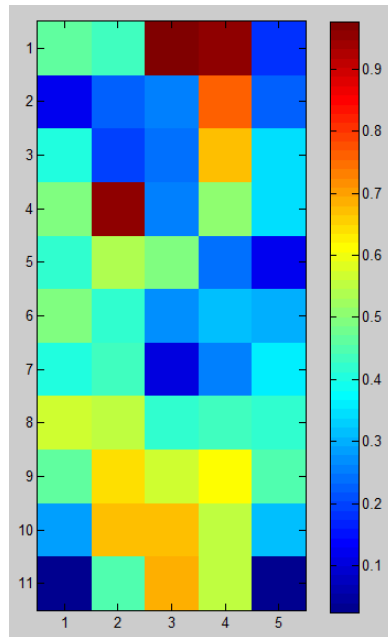


Fuente: Autor

La distancia entre los puntos ideales (intersecciones), de los seleccionados manualmente sobre la figura 39, se representa en la figura 40 como una imagen bi-dimensional, donde el valor de color en cada punto representa el error entre dicho punto y el valor ideal más próximo.

Cada cuadro representa las 5 intersecciones horizontales y las 11 verticales que existen, respectivamente. Aunque la distribución del error no es uniforme, se pueden ver concentraciones relativamente altas, en las partes central inferior y central superior, como resultado de las distorsiones introducidas por el lente. Los únicos puntos que mantienen bajo el error son los puntos esquina de la plantilla de calibración., puesto que estos se consideran idealmente localizados.

Figura 40. Error de desviación en [cm] de puntos, rejilla 4x10



Fuente: Autor

Figura 41. Efecto de la distorsión del lente sobre puntos ideales



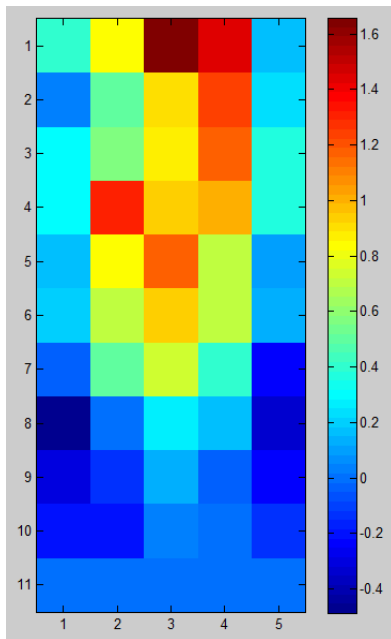
Fuente: Autor

En la imagen anterior se presenta un detalle de la distribución de los puntos de interés (rojo) sobre la imagen, comparados con los puntos esperados (azul) sobre el nuevo plano rectificado (imagen inferior). Debido a las simetrías de la distorsión radial estos defectos en la imagen rectificada tienden a compensarse unos a otros, debido a que en la parte superior los valores de interés (rojo) están por encima de los esperados (azules) (imagen superior).

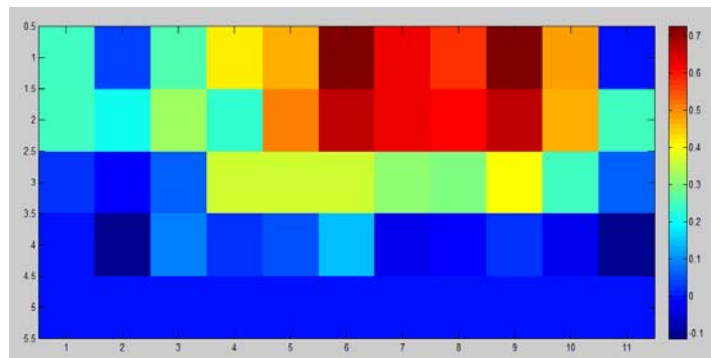
El efecto de compensación de desviación mantiene valores de error bajos, aun cuando es evidente la deformación en la imagen. La figura 42 a) muestra el error acumulado en centímetros que existe al medir verticalmente en cada columna de intersecciones, teniendo como referencia el punto de la base. Préstese atención a que el error se concentra en el centro de la imagen, y se incrementa a medida que el punto se aleja de la base o referencia, es decir, a lo largo de donde es mucho mas fuerte el efecto de la perspectiva. Se espera que a medida que los puntos son afectados por la perspectiva se aumente su incertidumbre de localización en la imagen rectificada, y por ende el error en las mediciones.

Debido a que los puntos mas lejanos se ven mas afectados por la perspectiva, estos se representan más tenues (figura 41 parte superior) en la imagen rectificada, por eso los puntos de interés donde se desean realizar las mediciones se escogen directamente en la imagen distorsionada. Aun así, una señal de que está presente una distorsión no controlada en la rectificación, es que las figuras 42 a) y 42 b) presenten un error bajo en sus extremos laterales y valores altos localizados hacia el centro.

Figura 42. Errores acumulados en [cm], rejilla 4×10



a) error acumulado vertical



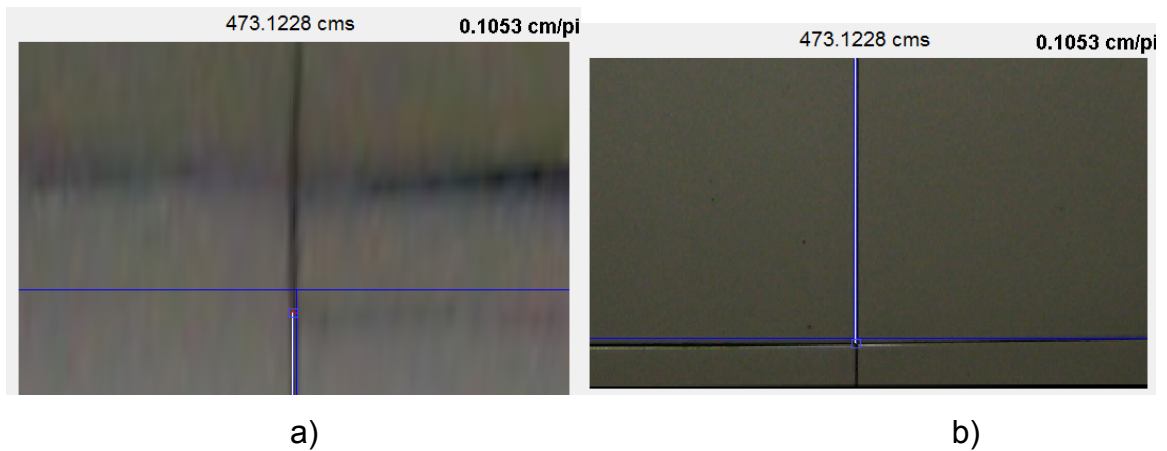
b) error acumulado horizontal

Fuente: Autor

Se debe tener siempre presente que las distribuciones del error analizadas en este numeral, están condicionadas a la influencia del error introducido al hacer la selección de los puntos manualmente. Por otro lado, una vez hecha la salvedad de la presencia de deformación en la imagen, los resultados son relativamente bajos haciendo que el proceso planteado sea válido para la extracción de información planimétrica en imágenes.

La configuración actual de plantilla permite medir longitudes del orden de 474 cm con una discrepancia de 0.8 cm, es decir, con un error más bajo del calculado al medir sobre los límites de la plantilla (1.6cm).

Figura 43. Efecto de compensación de error

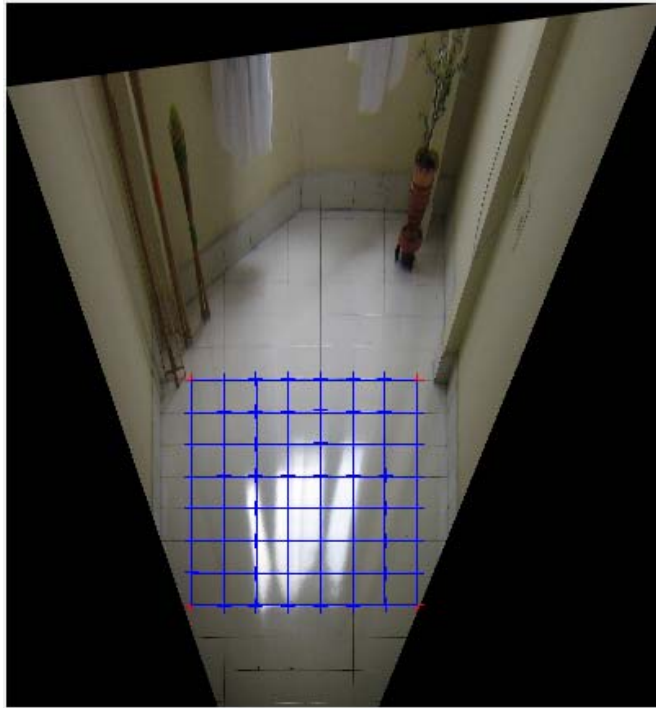


Fuente: Autor

La figura 43 muestra el efecto de cómo se compensa el error, por la distorsión del lente. En a) y b) el valor medido siempre está por debajo del valor esperado. Lo que finalmente disminuye el error en la medición.

Si se amplía el área de la plantilla de calibración a 7×7 cuadros o $221.2 \times 221.2 \text{ cm}^2$, se cambia la ubicación de la plantilla de calibración como se indica en la figura 44, y se mantiene la resolución en los 0.1053 cm/píxel . El valor de desviación en cm. tiene una distribución como en la figura 45.

Figura 44. Imagen rectificada, rejilla 7x7

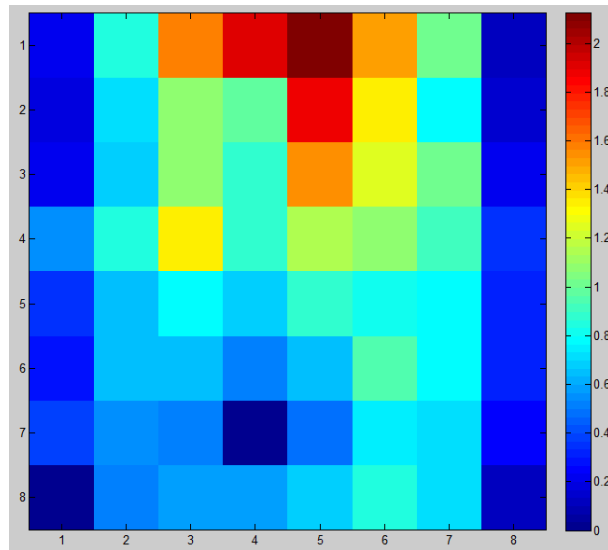


Fuente: Autor

El efecto de la distorsión radial, distribuye una vez más el error hacia la parte superior central de la rejilla. Aunque se aumenta el valor del error hasta los 2cm, se logra una distribución mas homogénea, lo que a la par se verá representado en las mediciones posteriores.

Esta homogeneidad del error, aumenta de manera cualitativa los resultados en la imagen rectificada, lo cual es muy conveniente, debido a que no solo se busca precisión en las mediciones, sino que el registro de la escena se mantenga bajo unos requerimientos judiciales aceptables.

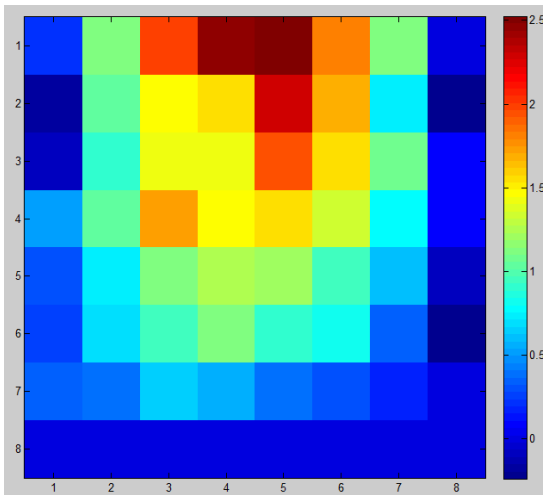
Figura 45. Error de desviación en [cm] de puntos, rejilla 7x7



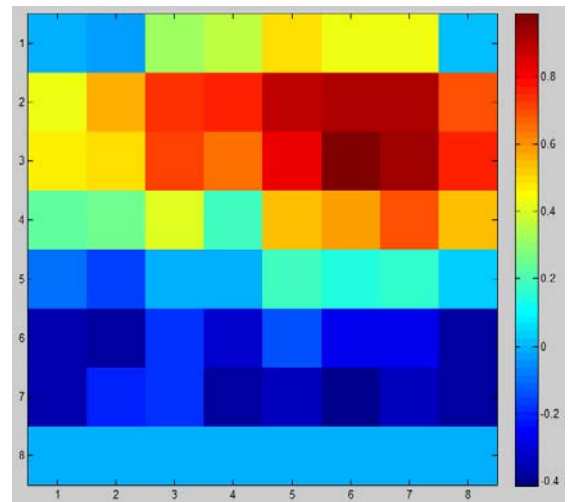
Fuente: autor

La figura 45 muestra que los límites laterales de la plantilla de calibración se ubicaron muy cerca de los valores deseados, es decir, los valores se alinean mejor horizontalmente, donde el efecto de la distorsión del lente se degrada por el efecto de la perspectiva.

Figura 46. Errores acumulados en [cm], rejilla 7x7



a) Error acumulado vertical



b) Error acumulado horizontal

Fuente: autor

Los resultados expresados en la figura 46 a) y b) siguen indicando la presencia de distorsión radial en la imagen rectificadas. Sin lograr reducir el error en ninguna de las dos direcciones, se obtuvo una mejora sustancial en el aspecto de la imagen rectificadas, a medida que esta se aleja de la plantilla de calibración.

Indiscutiblemente, la selección de una plantilla de calibración más extensa sobre la imagen, garantiza un mejor orden de los elementos de interés en la imagen rectificadas, algo definitivamente deseado cuando se presenta evidencia de una escena gráficamente.

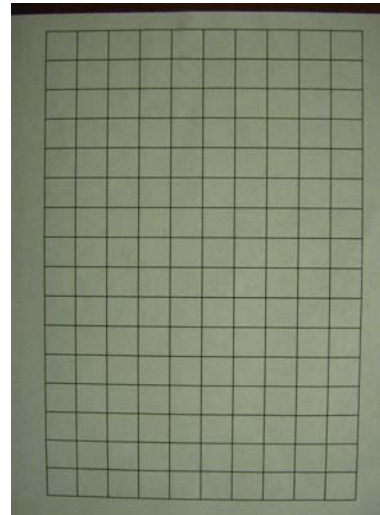
Hasta este punto los tamaños escogidos de la plantilla de calibración, han dado como resultado valores de error favorables en la extracción de información planimétrica en imágenes a medida que se extiende la plantilla de calibración sobre las áreas de interés donde se pretende medir.

9.2 RECTIFICACIÓN DE IMAGEN CON DISTORSIÓN RADIAL REDUCIDA.

Figura 47. Patrón geométrico y distorsión del lente



a)



b)

Fuente: Autor

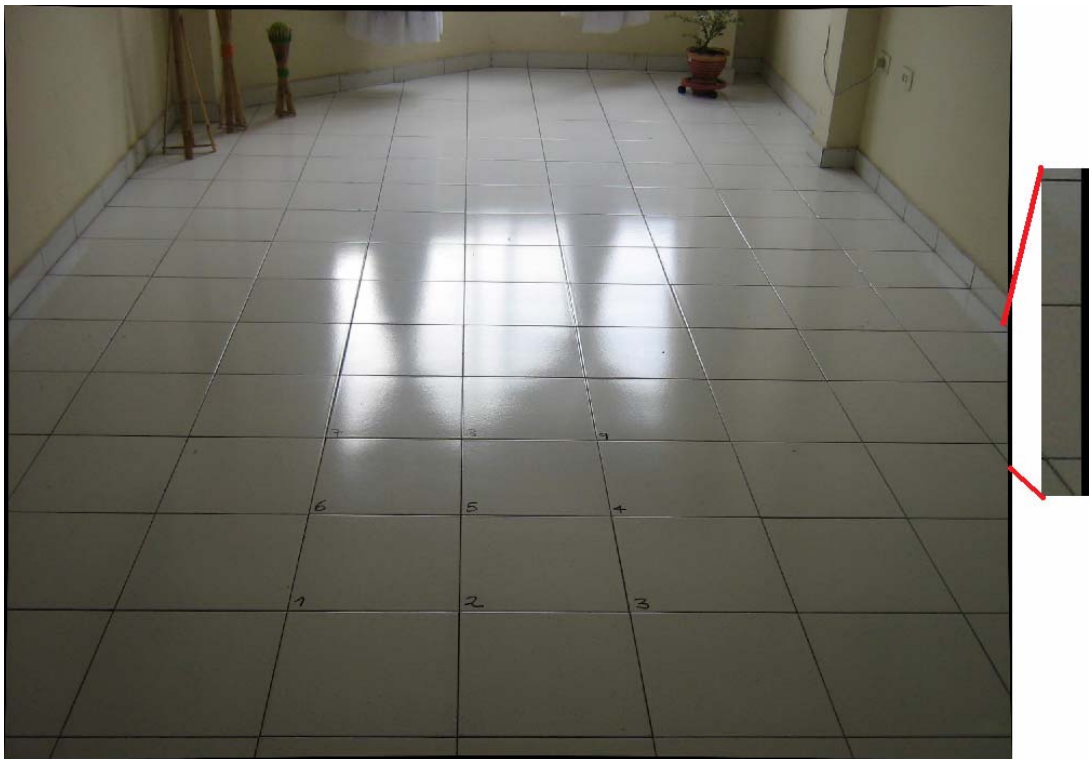
La figura 47 a) muestra un típico patrón cuadrado, la figura 47 b) muestra la distorsión introducida por el lente. Las dos imágenes fueron capturadas con una distancia focal de 5.4mm y capturadas con el mismo dispositivo, por lo que se considera que tienen una deformación radial muy similar, sin embargo es más evidente la distorsión en b) por ser una vista frontal.

Gracias a esta condición de reciprocidad, distancia focal vs distorsión radial, es posible establecer un modelo de deformación a una distancia focal fija, y deshacer la distorsión radial aun cuando no se permita hacerlo directamente con la información contenida en la imagen. (Ver anexo)

La Figura 48, muestra la imagen de prueba (figura 38) luego de ser sometida a una rectificación radial básica mediante los algoritmos comentados en el Anexo 1.

Para un modelo de distorsión radial con parámetros $k = 0.25996$, $c_x = 0.500000$, $c_y = 0.500000$, $s = 1.000000$, la imagen resultante reduce en gran parte la distorsión que causa el lente.

Figura 48. Imagen de prueba con supresión de distorsión radial.

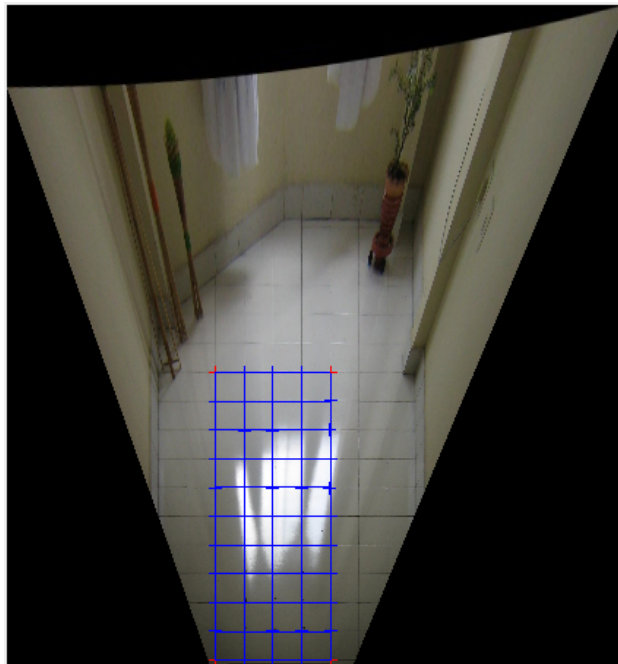


Fuente: Autor

Continuando con el procedimiento de validación, se selecciona la plantilla de calibración que inicialmente se escogió, de 4×10 baldosas de 31.6cm de lado c/u con un área total de $126.4 \times 316\text{cm}^2$, para analizar el comportamiento de los algoritmos de rectificación cuando se ha atenuado la distorsión radial en la imagen.

La figura 49, muestra en la parte superior el gran efecto adverso que tiene la distorsión radial sobre una imagen, y que se suprime previamente al proceso de rectificación.

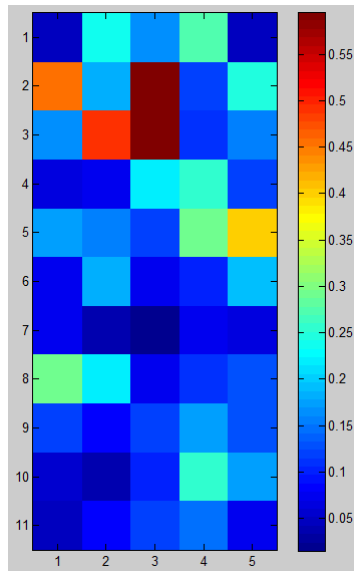
Figura 49. Imagen rectificada 4x10, con supresión de distorsión radial



Fuente: Autor

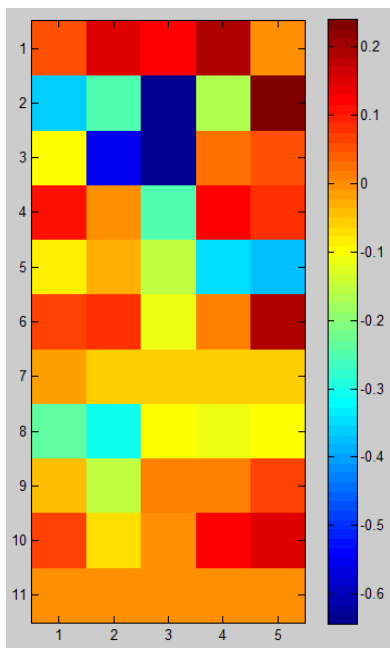
La figura 49 deja ver también la mejora sustancial que ha tenido el proceso de rectificación con la reducción de la distorsión radial. Se ha reducido considerablemente la desviación entre los puntos de interés y los deseados. En la figura 50 ya no son evidentes los patrones de aglomeración del error que se presentaban anteriormente. Tampoco es notoria la distribución que se presentaba en los errores acumulados, como puede verse en las figuras 51 a) y 51 b).

Figura 50. Error de desviación en [cm] de puntos, con supresión de distorsión radial

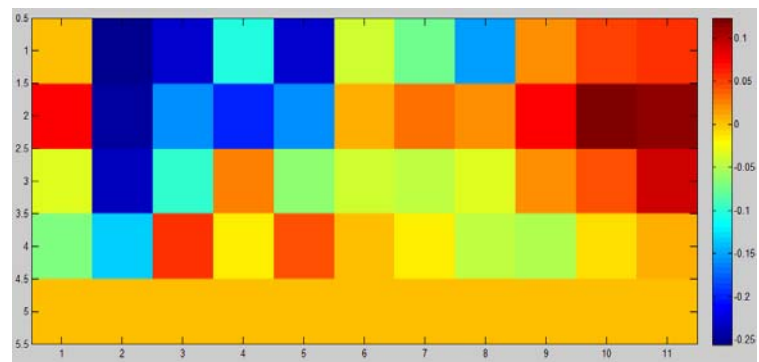


Fuente: Autor.

Figura 51. Error acumulado en [cm], con supresión de distorsión radial



a) Error acumulado vertical



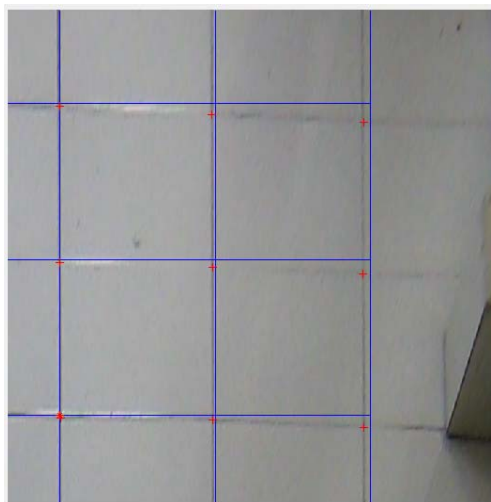
b) Error acumulado horizontal

Fuente: Autor.

El error se redujo considerablemente de 1.6cm y 0.7cm a valores de 0.6 cm y 0.25 cm, en los errores acumulados verticales y horizontales respectivamente. Con las mediciones realizadas sobre elementos dentro de la plantilla de calibración.

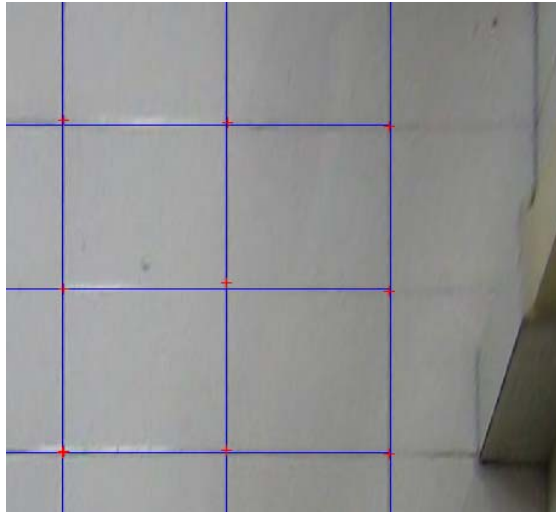
Sin embargo, también se evidencia la contribución que hubo en el aspecto general de la imagen rectificadora, mejorando el efecto de distorsión en elementos alejados de la plantilla de calibración. Las figuras 52 y 53 muestran una sección de las imágenes rectificadas, en los casos donde no se tiene en cuenta la distorsión radial y cuando se suprime previamente a la rectificación.

Figura 52. Elementos fuera de la plantilla, con distorsión radial



Fuente: Autor

Figura 53. Elementos fuera de la plantilla, con supresión de distorsión radial.

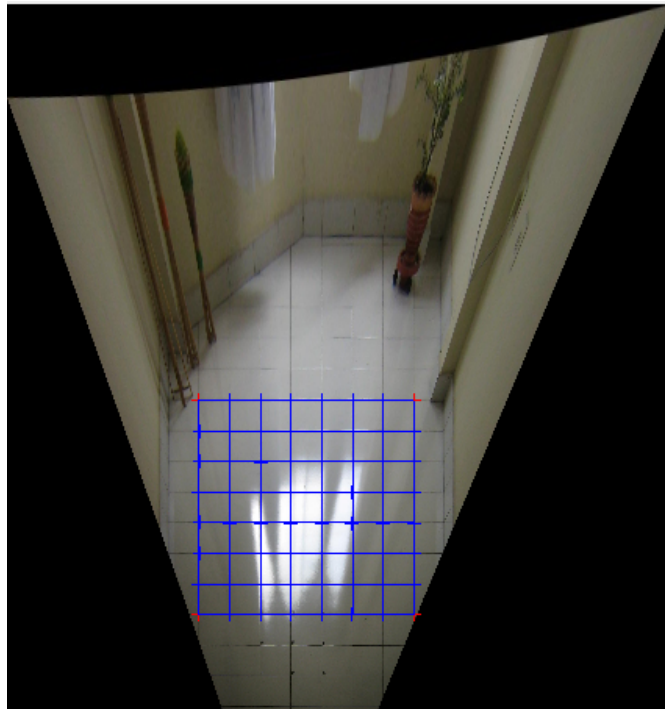


Fuente: Autor

Es notorio el efecto de la supresión previa de la distorsión radial, tanto en reducción del error como en el aspecto general de la imagen rectificada. Algo similar ocurre cuando la plantilla de calibración se aumenta a una selección de 7×7 baldosas.

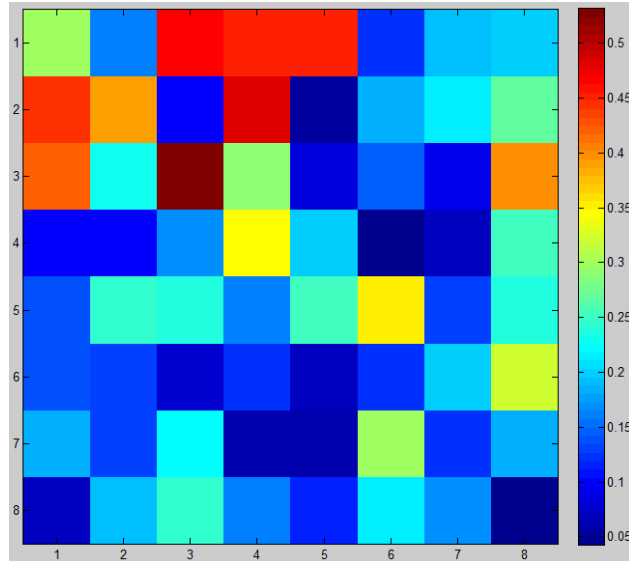
Igual que en la situación anterior, también se redujo el error de desviación, a la par con la obtención de precisión horizontal debida al aumento en 4 cuadros de la plantilla de calibración, logrando disminuir el error de 2cm a tan solo 0.5cm dentro de la plantilla y de 2.5cm a 0.6cm en mediciones verticales y de 0.8cm a 0.25cm en mediciones horizontales respectivamente. A su vez permitió obtener un error de desviación de puntos muy uniforme. Ver figura 55

Figura 54. Imagen rectificada con rejilla 7*7, con supresión de distorsión radial.



Fuente: Autor

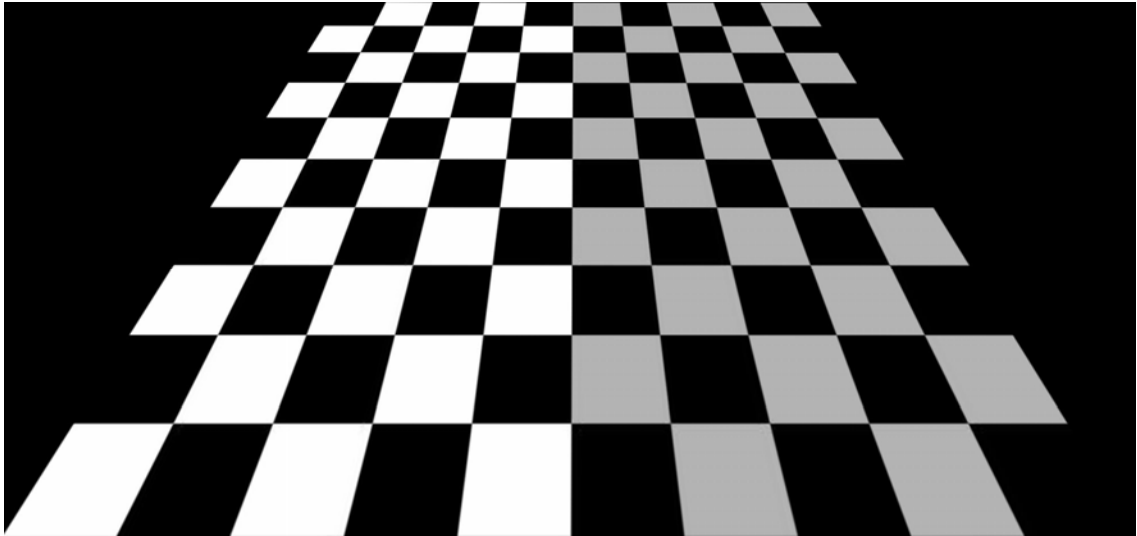
Figura 55. Error de desviación en [cm] de puntos, con supresión de distorsión radial, rejilla 7x7



Fuente: Autor

Finalmente se utilizó el procedimiento para rectificar una imagen virtual de un plano en perspectiva, con el objeto de estimar el error que se introduce al realizar las mediciones.

Figura 56. Imagen virtual con distorsión perspectiva

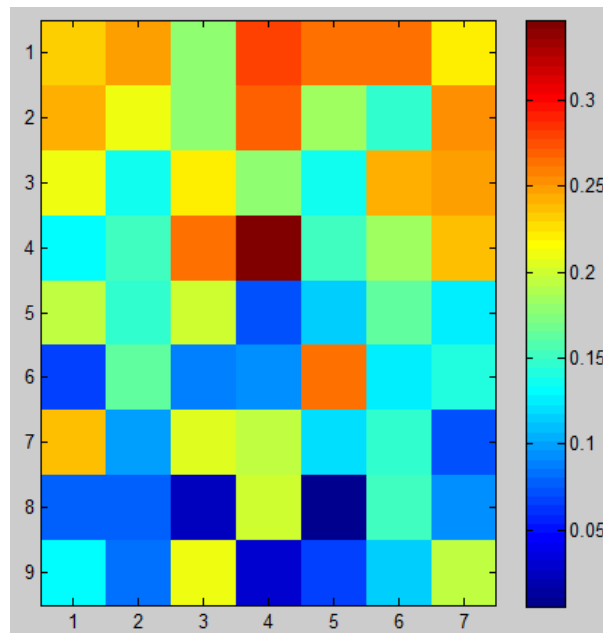


Fuente: Autor

Los resultados obtenidos con esta imagen permitieron evidenciar que la selección de una plantilla de calibración que cubra la mayor porción de área en la imagen distorsionada, trae como resultado una reducción del error y una mejora sustancial en el aspecto de la imagen rectificadas. También, que solo el efecto de la perspectiva tiende a ser relevante en el aumento del error y debe tener solo consecuencias cuando las mediciones se realizan verticalmente, a lo largo del punto de fuga.

La figura 57 muestra la distribución del error entre elementos de la plantilla de calibración, donde no existe ningún otro tipo de deformación en la escena, se mantiene homogéneo a lo largo y ancho de la plantilla de calibración.

Figura 57. Error de desviación en [cm] de puntos en imagen virtual



Fuente: Autor

Todos resultados anteriores se condensan en la tabla 4, donde se identifica el comportamiento de los resultados en el proceso de validación al procedimiento indicado en el capítulo 6. Es necesario hacer una aclaración con respecto al proceso de validación realizado. Todos los valores indicados anteriormente se presentan de acuerdo con los datos obtenidos de la imagen de prueba (figura 37). Aunque durante el procesamiento de otras imágenes aparecen valores de error por debajo o por encima de los que aquí se mencionaron, el comportamiento general se mantiene debido al principio de escala mencionado con anterioridad en este apartado.

Tabla 4. Comportamiento del error con y sin distorsión radial.

Tipo de Imagen	Tamaño de la plantilla	máximo error acumulado	Medida por fuera de la plantilla	% aprox. área de la plantilla
Con distorsión radial	4×10 124.6×316cm ²	1,6 cm	473,12 cm	30%
	7×7 221.2×221.2cm ²	2,5 cm	476,32 cm	36%
Con reducción de distorsión radial	4×10 124.6×316cm ²	0,6 cm	476,68 cm	30%
	7×7 221.2×221.2cm ²	0,7 cm	476,53 cm	36%

*Valor real: 474 cm

Fuente: Autor

Para determinar un estimativo de la precisión que ofrece el proceso implementado se realizaron 5 mediciones horizontales y verticales, repitiendo completamente el procedimiento para estos casos (selección de plantilla, rectificación, medición).

Esta rutina brinda información sobre de la repetitividad (precisión) del proceso implementado. La figura 58 muestra las dos secciones escogidas para las mediciones, como el algoritmo permanece invariante si se mantienen los 4 puntos fijos en las esquinas de la plantilla, estas mediciones van a permitir observar los efectos que se introducen en la selección manual de los puntos.

Figura 58. Mediciones repetidas sobre la imagen



Fuente: Autor

Tabla 5. Repetición de mediciones

# medición	horizontal	Vertical
1	252,4336	485,0566
2	252,4216	485,4879
3	252,4731	485,697
4	252,2299	484,6403
5	252,3303	484,6289

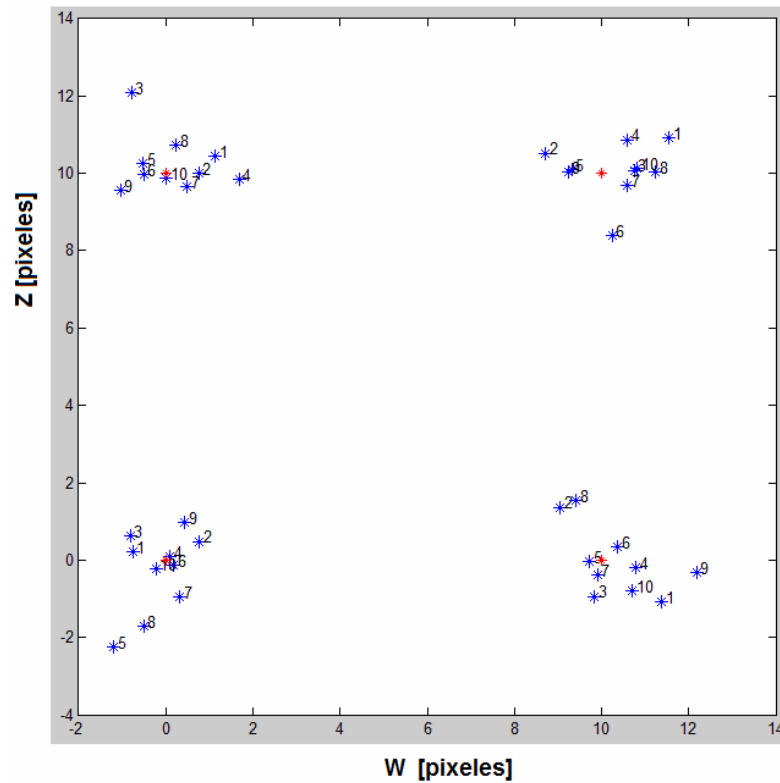
media	252,3777	485,10214
σ	0,0978	0,485

*Valores en cm.

Los resultados de la tabla 5, señalan que los cambios significativos en σ , probablemente se deban a los efectos de la perspectiva (por ser la medición en dirección vertical), tanto en la dificultad que existe de localizar un punto en la imagen distorsionada a medida que se acerca al punto de fuga, como por el efecto de incrementar el error en la imagen rectificadas en esa dirección.

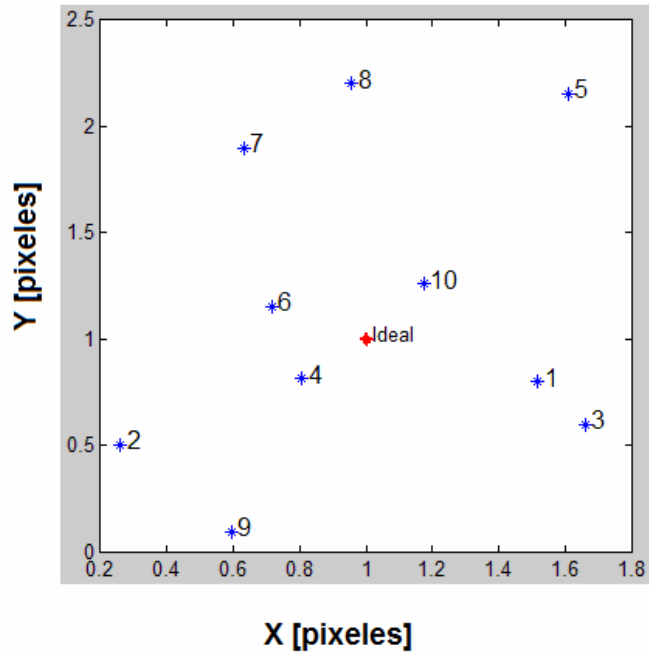
Para conocer el efecto que tienen sobre los puntos de la imagen rectificadas los errores introducidos al seleccionar manualmente las esquinas de la plantilla de calibración. Se calcularon diferentes transformaciones inversas, donde los valores seleccionados variaban según una distribución normal con media 0 y varianza 1. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 59 y 60.

Figura 59. Variaciones de los puntos seleccionados.



Fuente: Autor

Figura 60. Variaciones de los puntos rectificados



Fuente: Autor

Para la selección de cada uno de los puntos (1-10) (figura 59) sobre la imagen distorsionada, se tiene una distribución de puntos (1-10) (figura 60) sobre la imagen rectificadas.

Son visibles los efectos que causa en la transformación inversa, que los puntos se seleccionen manualmente. Este proceso constituye una fuente inevitable de error en las mediciones, y se suma a los introducidos por la distorsión radial. Para el caso de la imagen virtual, representa una de las fuentes principales de error.

10 CONCLUSIONES

Se logró el objetivo principal, que consistía en desarrollar una aplicación para recuperar información planimétrica de imágenes digitales. Aunque en principio se esperaba que el campo de aplicación se limitara al área de accidentes de tránsito, a lo largo del propio diseño e implementación se observó la gran amplitud de posibilidades que ofrece la técnica como herramienta en el campo forense en general.

Los principales logros alcanzados en el presenta trabajo son:

- Se implementaron técnicas basadas en el tratamiento digital de imágenes para relacionar los planos de escenas reales con los planos presentes en imágenes digitales.
- Se implementaron dos procedimientos algorítmicos basados en procesamiento digital de imágenes, para relacionar los puntos sobre una plantilla de calibración en el plano real con los puntos sobre el plano de la imagen, que ofrecieron cotas de error porcentual de 0.7% en mediciones realizadas verticalmente, y de 0.4% en mediciones realizadas horizontalmente, en condiciones óptimas de escogencia de la plantilla de calibración.
- Se exploró en el campo de las coordenadas homogéneas, y se dejaron abiertos muchos caminos que pueden generar futuros trabajos de investigación.

- Se exploró la compensación de la distorsión radial como herramienta para mejorar los resultados métricos de las imágenes y reducir el error en las mediciones.
- Se desarrolló una metodología que permite extraer características geométricas de huellas de frenado a partir de imágenes, mediante tratamiento digital de imágenes, particularmente mediante la generación de orto-imágenes de gran calidad en sus propiedades métricas.

11 OBSERVACIONES

Aunque la implementación de los algoritmos bajo la plataforma MATLAB, permita que sean explorados, mejorados o supervisados cada vez que el procedimiento judicial lo advierta necesario, con objeto de validar o no los resultados obtenidos, resulta altamente ventajosa la independencia de la plataforma MATLAB, como en el caso de programas en código ejecutable, algo que puede aumentar su desempeño potencialmente.

Mejorar el aspecto general de la interfaz para disminuir la demora en el procedimiento, haciendo mucho más agradable el trabajo continuo con la herramienta.

Mejorar los algoritmos para aumentar a 3 dimensiones la rectificación, no solo de planos sino también de escenas completas, mediante el uso transformaciones proyectivas

Seguir integrando nuevas herramientas para la extracción de características geométricas en las imágenes rectificadas y ampliar el campo de aplicación, por ejemplo, al campo de balística.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BOSE, Biswajit and GRIMSON, Eric. Ground Plane Rectification by Tracking Moving Objects. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139, USA.

- [2] CRIMINISI, Antonio; REID, Ian D. and ZISSERMAN, Andrew. Single View Metrology. En: International Journal of Computer Vision (2000). v. 40(2), p. 123-148

- [3] _____ A plane measuring Device. Dep.. Engineering Science. University of Oxford. Parks Road. Oxford. UK.

- [4] P. D. Kovesi, Matlab and octave functions for computer vision and image processing. Software de libre referencia en <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>.

- [5] HARTLEY, Richard and ZISSERMAN, Andrew. Multiple View Geometry in Computer Vision. Second Edition., Cambridge University Press. 2004.

- [6] JOHNSON, Micah K. and FARIA, Hany. Metric measurements on a plane from a single image. Department of computer science. Dartmouth College.

- [7] LIEBOWIT, David and ZISSERMAN, Andrew. Metric Rectification for Perspective Images of Planes. Robotics Research Group. Department of Engineering Science. University of Oxford. Oxford OX1 3PJ, UK.

- [8] MOHR, Roger and TRIGGS, Bill. Projective Geometry for Image Analysis. En: A Tutorial given at ISPRS. Viena. 1996

- [9] DEVERNAY, Frédéric and FAUGERAS, Olivier. Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. Sophia Antipolis Cedex. France.

- [10] MERY, Domingo. Visión por computador. Apuntes para el Curso. Departamento de Ciencia de la Computación. Pontificia Universidad Católica de Chile. 2004.

ANEXO 1

Generalmente todas las cámaras, sobre todo las cámara comerciales convencionales, introducen ciertas aberraciones a las imágenes. Estas aberraciones ópticas son producto de las desviaciones de los rayos de luz del comportamiento paraxial. Están presentes aun en ausencia de defectos en la construcción de los lentes y varían de una cámara a otra.

Las principales aberraciones ópticas son la aberración esférica, coma, astigmatismo, campo de curvatura, distorsión radial y distorsión cromática. Dentro de estas distorsiones no lineales, la distorsión radial, que parte del centro de la imagen y se extiende radialmente, es a la vez la más grave y la más común.

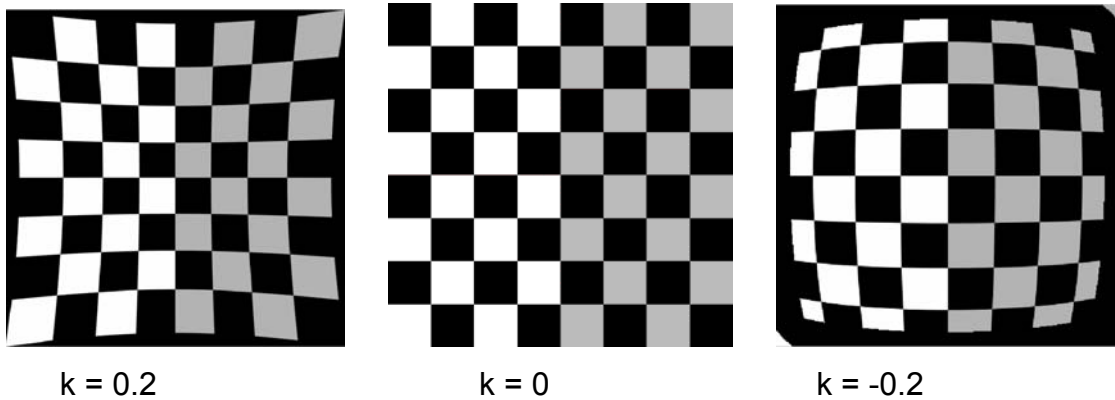
Un modelo simple para esta distorsión se puede realizar si se considera $I(x, y)$ como una imagen ideal sin distorsión y $I(x_d, y_d)$ como la imagen distorsionada, donde las coordenadas distorsionadas de $I(x_d, y_d)$, son de la forma:

$$x_d = x(1 + kr^2) + c_x \quad \text{y} \quad y_d = y(1 + kr^2) + c_y,$$

donde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, k determina la intensidad de la distorsión radial, y (c_x, c_y) es el centro de la distorsión que generalmente coincide con el punto principal.

Los dos patrones de distorsión que se producen son del tipo cojín y del tipo barril, con efectos son simétricos en cualquiera de los casos. La figura 61 muestra el efecto de la distorsión sobre una imagen cuando el valor de intensidad es positivo o negativo., respectivamente.

Figura 61. Distorsión radial respecto a k



fuelle: Autor

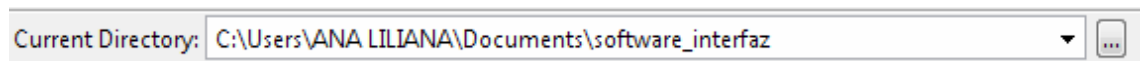
Debido a la simetría de la distorsión, en algunos lentes desmontables, sobre todo de cámaras profesionales, existen dispositivos internos que compensan estas distorsiones. Sin embargo, los lentes teleobjetivos o gran-angulares, no se compensan estas deformaciones. La distorsión de barril se encuentra en el gran-angular, tratando de condensar la imagen a un menor espacio, al contrario la distorsión tipo cojín de los teleobjetivos intenta estirar la imagen para encajarla al espacio. Debido al costo de las cámaras profesionales que compensen estas distorsiones, se han desarrollado bastantes modelos matemáticos que permiten deshacer la distorsión digitalmente.

Unos de estos métodos, es el propuesto en Devernay [9], que utiliza las mismas rectas presentes en la imagen para determinar el valor de deformación k., debido que una línea en la escena 3D se representa también como una línea en el plano de la imagen. Se realiza primero una detección de las líneas sobre la imagen distorsionada. Luego se estima el error entre los segmentos de línea distorsionada y sus correspondientes en las líneas rectas. El proceso de optimización se repite hasta que el error relativo es inferior a un umbral. Una implementación del algoritmo de Devernay en MATLAB está a disposición del público en [4], del cual se hace uso en el presente trabajo.

ANEXO 2

Funcionamiento de la interfaz

Para empezar a trabajar con las interfaces de rectificación se debe seleccionar la carpeta que contiene los archivos de programa, como directorio de trabajo en MATLAB.



Una vez se escoja el directorio de trabajo, las dos interfaces se invocan desde el prompt de MATLAB así:

Si se desea rectificar una imagen utilizando 4 puntos esquina de una plantilla de calibración con escala conocida, se debe escribir en el prompt: `interfaz_4puntos`

```
>> interfaz_4puntos  
>>
```

Si se desea rectificar una imagen utilizando la información contenida en los puntos de fuga, se debe escribir en el prompt: `interfaz_puntosfuga`

```
>> interfaz_puntosfuga  
>>
```

Estos comandos inicializan las interfaces de las figuras 23 y 24, el procedimiento para rectificar una imagen y realizar mediciones sobre ella, se detalla a continuación.

Procedimiento de rectificación de imagen a partir de cuatro puntos.

- Una vez se dispone de la interfaz como la que aparece en la figura 23, se selecciona el botón Cargar Imagen (ver 7.1.1) y se selecciona la imagen que se desea rectificar.
- Cuando se haya cargado correctamente la imagen distorsionada el siguiente paso es seleccionar los 4 puntos esquina de la plantilla de calibración, mediante el botón Seleccionar Puntos (ver 7.2.1). La selección de estos puntos se debe hacer en sentido contrario a las manecillas del reloj como se indica en la figura 25.

La selección de los puntos se hace en una nueva ventana que permite hacer una mejor selección de los puntos mediante ampliaciones y reducciones de la imagen. Tenga en cuenta que de esta selección dependen directamente los resultados obtenidos en la rectificación de la imagen.

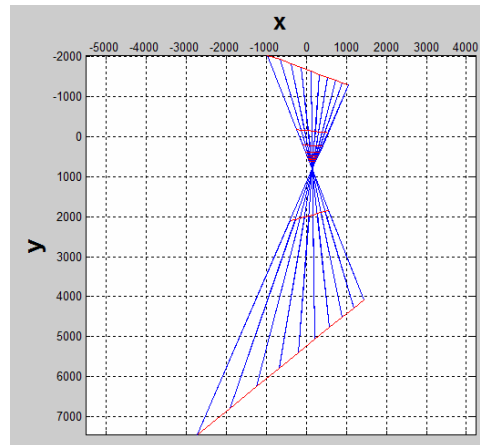
Nota: La selección de puntos en cualquier parte del procedimiento de rectificación, se termina mediante dos clicks consecutivos del botón derecho del Mouse o con presionar la techa Enter.

- Cuando ya se dispone de por lo menos 4 puntos sobre la plantilla de calibración, el paso siguiente es determinar la relación de aspecto de la plantilla de calibración. En la ventana

Dx	Dy
<input type="text"/>	<input type="text"/>

- Se deben indicar las proporciones horizontal y vertical de la plantilla de calibración. Por defecto la plantilla de calibración escogida es cuadrada, luego los valores se escogerían así: $Dx = 1$, $Dy = 1$. Hay que tener especial cuidado de elegir los valores correctos para Dx y Dy , por que de estos depende tanto la ubicación y el tamaño de la imagen final en el espacio de salida.
- El paso siguiente es determinar la ubicación del espacio de salida, para esto se utiliza el Botón Analizar (ver 7.1.3). Esto permite estimar si la selección de los 4 puntos rectificará eficazmente la imagen. Los resultados que se arrojan corresponden a los de la figura 22. Si se desea rectificar la imagen en su totalidad simplemente se debe continuar con botón Rectificar Imagen, sin tener en cuenta los resultados del análisis previo. Caso contrario, se deben seleccionar los valores adecuados para los límites inferiores y superiores (ver 7.1.5)
- Hay que tener especial cuidado cuando la imagen a rectificar contiene puntos de fuga. Los datos se deben interpretar correctamente del análisis previo con el fin de obtener la porción de la imagen rectificada que se desea. La figura 10 muestra un caso típico de una imagen que contiene un punto de fuga. En este caso particular los datos del análisis son los que aparecen en la figura 62.

Figura 62. Ubicacion del espacio de salida para la figura 10.



Fuente: Autor

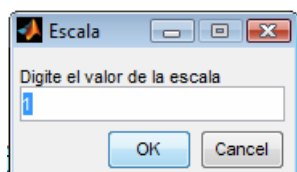
Unos valores aceptables para la selección del espacio de salida serían:

	X Data	Y Data
Min	-233	-174
Max	547	614

La información contenida en otra porción del espacio de salida simplemente no es de interés por estar por fuera del plano contenido en la imagen.

- El siguiente paso es rectificar la imagen con el botón Rectificar Imagen, este hará la salvedad si se desea tener en cuenta ó no, los limites inferiores y superiores.
- Si se desean hacer mediciones sobre la imagen rectificada se utiliza el botón Rectificar Puntos (ver 7.1.4). Los puntos que se deseen rectificar serán seleccionados directamente sobre la imagen distorsionada para aprovechar toda la resolución de imagen original. Una vez se han seleccionado los puntos de interés sobre la imagen rectificada el software

pedirá que se le indique la escala real en centímetros a la que se encuentran los puntos 1 y 2 que se seleccionaron al inicio del proceso de rectificación, esto es necesario para que las mediciones posteriores estén en la escala real. El valor por defecto de la escala es 1 (uno).



Procedimiento de rectificación de imagen a partir de puntos de fuga.

- Al igual que en el procedimiento descrito anteriormente, una vez se dispone de la interfaz como la que aparece en la figura 24, se selecciona el botón Cargar Imagen (ver 7.1.1) y se selecciona la imagen que se desea rectificar.
- El procedimiento siguiente es identificar en la imagen pares de líneas paralelas sobre la imagen distorsionada con el fin de calcular los dos puntos de fuga. Estas se indican mediante el botón Puntos de Fuga (ver 7.2.3). Se eligen siempre en duplas paralelas, independientemente de su orientación y dirección. Por lo general se escogen en lados opuestos de la plantilla de calibración siguiendo los lineamientos descritos en la tabla 3.
- El procedimiento continua mediante el botón Analizar (ver 7.1.3) que aproxima el espacio de salida y la ubicación de la imagen rectificada. Al igual que el procedimiento de rectificación mediante 4 puntos, es indispensable que se interpreten correctamente los resultados de este análisis con el fin de tomar los correctivos necesarios para mejorar los resultados de la rectificación.

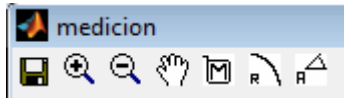
- Para devolver las propiedades afines a la imagen distorsionada se rectifica mediante el botón Proyectividad (ver 7.2.4).
- En este punto se debe seleccionar el procedimiento que se va a seguir para conseguir la imagen rectificadora final. Existen dos variantes para calcular la transformación final (ver 6.9). Si se escoge el cálculo mediante dos ángulos rectos, se pulsa sobre el botón Dos Ángulos Rectos (ver 7.2.5.5) y se escogen mediante el procedimiento de selección normal dos pares de líneas ortogonales, de tal forma que las líneas 1,2 y 3,4 sean perpendiculares entre sí. Se debe garantizar que no exista paralelismo entre ninguna de ellas.
- Si se escoge la rectificación mediante el método contrario, siempre se deben elegir por lo menos dos de los ítems mencionados en 6.9.2, para que exista a lo sumo una intersección en el plano complejo α y β .
 - Si se desea elegir un ángulo real se debe colocar el su respectivo campo (ver 7.2.5.1) el valor en grados.
 - Si se desea elegir una razón entre dos segmentos de línea, el valor se debe colocar en su respectivo campo (ver 7.2.5.2). Siempre se debe elegir el segmento de mayor longitud al principio de la selección.
 - Si se desea elegir un par de ángulos iguales, se selecciona el botón Ángulos Iguales (ver 7.2.5.3). Se debe tener en cuenta la dirección con que se eligen los segmentos para que correspondan al ángulo deseado, también es necesario que entre los segmentos seleccionadas (4 en total) no exista paralelismo.




- Una vez exista una cantidad clara de intersecciones en el plano complejo α y β , se selecciona el botón Intersección (ver 7.2.5.4), para identificar manualmente la intersección de los círculos complejos. Se debe hacer uso de las herramientas de zoom para localizar previamente el conjunto de intersecciones y que la interfaz ofrezca mejores resultados.
- Cuando el botón Afinidad (ver 7.2.6) este habilitado. Al pulsar sobre el se obtendrá finalmente la imagen rectificadora donde se podrán realizar mediciones.
- Si se desean realizar mediciones sobre la imagen se utiliza el botón Rectificar Puntos (ver 7.1.4). Los puntos que se deseen rectificar serán seleccionados directamente sobre la imagen distorsionada anterior para aprovechar toda la resolución de imagen original. Se deben escoger por lo menos 4 puntos sobre la imagen distorsionada, los primeros dos puntos seleccionados indicaran el segmento que se utilizara como escala de la imagen rectificadora, por eso es necesario que se conozca esta medida real en centímetros antes de continuar con la extracción de información planimétrica. Una vez se seleccionen los puntos se debe indicar la escala en la ventana correspondiente. El valor por defecto es la unidad (1)

Interfaz de medición

Una vez que el usuario indica la escala, se puede empezar a extraer la información planimétrica de la imagen.

La interfaz de medición contiene una serie de herramientas matemáticas que permiten extraer información del plano rectificado.



- Para extraer longitudes sobre la imagen se utiliza la herramienta identificada con el icono . En este caso se eligen dos puntos sobre la imagen rectificad y inmediatamente la interfaz desplegará una regla entre los puntos que indica su distancia en píxeles y el valor escalado (real) en la parte superior.
- Para extraer el radio de curvatura de algún elemento de la imagen rectificad se utiliza la herramienta identificada con el icono . En este caso se seleccionan puntos sobre la imagen rectificad y inmediatamente la interfaz desplegará una regla entre el punto medio del arco y su centro calculado, que indica la distancia en píxeles y el valor escalado (real) en la parte superior del radio de curvatura deseado.
- Para extraer el ángulo entre dos líneas presentes en la imagen rectificad, se utiliza el icono . Primero se deben elegir dos puntos en cada línea, inmediatamente la interfaz desplegará cada uno de los segmentos de línea identificados y el menor ángulo de intersección entre dichos segmentos.

En cualquier momento del procedimiento descrito es posible que el usuario se encuentre con ventanas que advierten que la selección anterior de puntos o líneas ha sido errónea. El usuario debe responder cerrando las ventanas correspondientes e intentar nuevamente la selección de las características variando el orden de selección según sea el caso.