

**IMPLEMENTACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA EN
PLANOS TOPOGRÁFICOS COMO COMPONENTE
INTERACTIVO DE LOS ENTORNOS GEOGRÁFICOS
VIRTUALES**

Estudiantes:

Lina Marcela García Moreno
Código: 201044434-3740

Euclides Barandica Zemanate
Código: 200933426-3740

Directores:

Ing. Humberto Loaiza Correa Ph. D.
Ing. Jean Pierre Diaz

Programa Académico de Ingeniería Topográfica
Universidad del Valle
Cali - Colombia

10 de abril de 2016

Índice general

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	4
3. Objetivos	6
3.1. Objetivo General	6
3.2. Objetivos Específicos	6
4. Justificación	7
5. Marco conceptual	9
5.1. Visión Artificial	9
5.1.1. Realidad Aumentada	9
5.2. Entornos Virtuales Geográficos	10
5.3. Planos Topográficos	11
5.4. Transformaciones Geométricas	11
5.4.1. Sistema de Coordenadas	11
5.4.2. Coordenadas Homogéneas o Proyectivas	11
5.4.3. Proyección Perspectiva	12
5.5. Calibración	12
5.5.1. Parámetros Intrínsecos	12
5.5.2. Parámetros Extrínsecos	12
5.6. Modelos Existentes de la Superficie	12
5.7. Técnicas de Visualización	13
5.8. Tracking o Seguimiento	13
6. Marco Teórico	15
6.1. Modelo de la Cámara	15
6.1.1. Transformación del Sistema Coordinado	16
6.1.2. Transformación del Sistema Coordinado del Dispositivo de Captura de Imágenes al Sistema Coordinado de la Imagen	17
6.1.2.1. Parámetros Intrínsecos	18
6.1.2.2. Parámetros Extrínsecos	19
6.1.3. Transformación del Sistema Coordinado del Mundo Real al Sistema Coordinado del Dispositivo de Captura	20
6.1.4. Calibración	21
6.1.4.1. Método Faugeras-Toscani	22

6.1.4.2. Método de Calibracion de Heikilla y Silven	23
6.2. Reconocimiento de Patrones	25
6.2.1. Redes Neuronales	25
6.3. Espacios de Color	26
6.3.1. Espacio de Color RGB	26
6.3.2. Espacio de Color HSV	27
6.4. Método de interpolación media móvil	27
7. Marco Referencial	29
8. Hardware del Sistema	31
8.1. Cámara Web	32
8.2. Plano Topográfico	32
8.3. Plantilla de Marcadores	32
8.4. Computador	33
8.5. Conclusiones	34
9. Software del Sistema	35
9.1. Reconstrucción de la Superficie	35
9.2. Calibración	38
9.3. Estimación de la posición de la cámara	38
9.3.1. Captura de las Imágenes	39
9.3.2. Preprocesamiento	39
9.3.3. Detección de Marcadores	40
9.3.4. Descripción de Marcadores	41
9.3.5. Clasificación y Asignación de Coordenadas	42
9.3.6. Cálculo de la Posición de la Cámara.	43
9.4. Visualización del Modelo Virtual	44
9.5. Conclusiones	45
10. Pruebas y Resultados	46
10.1. Calibración de la Cámara	46
10.1.1. Procedimiento	46
10.1.2. Resultados	47
10.2. Análisis de la Clasificación	49
10.2.1. Procedimiento	49
10.2.2. Resultados	49
10.3. Evaluación Cuantitativa del Sistema	53
10.3.1. Estimación de la posición de la cámara	53
10.3.1.1. Procedimiento	53
10.3.1.2. Resultados	54
10.3.2. Estimación del Tiempo de Ejecución por cada Modo de Captura	55
10.3.2.1. Procedimiento	55
10.3.2.2. Resultados	55

10.4. Evaluación Cualitativa del Sistema	55
10.4.1. Ensayos Prácticos por los Usuarios	55
10.4.1.1. Procedimiento	56
10.4.1.2. Resultados	57
10.5. Conclusiones	58
11. Conclusiones	60
12. Limitaciones	62
13. Trabajos futuros	63
Bibliografía	64

Índice de figuras

1.1. Configuración física de la plataforma: a) Plano Topográfico, b) Dispositivo de captura de imágenes, c) Unidad de procesamiento, e) Plantilla de marcadores. . Tomado de Petrasova et al. (2014)	2
5.1. Diagrama general para la implementación de realidad aumentada.	10
5.2. Sistemas coordenados en realidad aumentada.Tomado de Gonzáles et al. (2011)	11
5.3. Proyección de un objeto sobre un plano.Tomado de Aliaga (2014)	12
6.1. Modelo de Pinhole. Tomado de Nájera Gutierrez (2009)	16
6.2. Transformaciones de sistemas de coordenadas.. Tomado de Roncagliolo et al. (2007)	17
6.3. Parámetros extrínsecos de la cámara. Tomado de Patrone (2013)	19
6.4. Estructura de una red neuronal	25
6.5. Cubo de colores RGB y esquemático.	26
6.6. Esquema de espacio de color HSV.	27
8.1. Relación entre los componentes del hardware.	31
8.2. Configuración física de la plataforma: a) Plano Topográfico, b) Cámara web, c) Computador y d) Plantilla de marcadores.	31
8.3. Plantilla de marcadores.	33
9.1. Diagrama de procesamiento del sistema.	35
9.2. Área en común de la ortofoto y la nube de puntos.	36
9.3. Nube de puntos inicia sobre la superficie calculada.	37
9.4. Integración de la superficie y la ortofoto.	37
9.5. Proyección de coordenadas mundo real - imagen. 	38
9.6. Diagrama de procesos de la estimación de la posición de la cámara.	39
9.7. Corrección de Brillo.	40
9.8. Binarización de la imagen.	41
9.9. Determinación de centroides de la imagen.	41
9.10. Especificaciones de la red.	42
10.1. Patrón de calibración.	46
10.2. Posiciones de captura del patrón de calibración.	47
10.3. Error de reproyección.	48
10.4. Distribución de la clasificación por redes neuronales.	50

10.5. Gráfica de desempeño de la red neuronal.	50
10.6. Matriz de confusión de los datos de entrenamiento de la red neuronal. . .	51
10.7. Matriz de confusión de los datos de validación de la red neuronal.	51
10.8. Matriz de confusión de los datos de prueba de la red neuronal.	52
10.9. Matriz de confusión total de la red neuronal.	52
10.10 Representación de ángulo de azimuth y elevación.	53
13.1. Interfaz gráfica del sistema.	69
13.2. Módulo de selección de la cartografía a visualizar.	70
13.3. Módulo de visualización de la cámara web y número de capturas realizadas.	70
13.5. Módulo de captura de video, modo dinámico.	70
13.4. Resultados de la implementación de la aplicación de realidad aumentada. .	71
13.6. Módulo de salida y reanudación.	71

Índice de cuadros

5.1. Categorización por tipo de implementación en realidad aumentada.	10
8.1. Características del computador utilizado.	33
9.1. Resultados de modelos virtuales generados.	44
10.1. Características de los pixeles del dataset.	49
10.2. Errores en los ángulos representados.	54
10.3. Resultados de tiempo de la ejecución del sistema en segundos.	55
10.4. Formato de evaluación de los ensayos prácticos por parte de los usuarios. .	56
10.5. Porcentajes de satisfacción según atributo y modo de prueba.	57
10.6. Porcentajes de satisfacción por evaluador respecto a cada atributo.	58

Agradecimientos

Agradecemos a todas las personas que hicieron parte de este proceso y que contribuyeron en diferentes aspectos para que nuestro proyecto finalizara satisfactoriamente, gracias por su apoyo constante que permitió llevarnos a formarnos finalmente como ingenieros topográficos:

A nuestros directores, Jean Pierre Diaz que se convirtió en un gran amigo y Humberto Loaiza, por abrirnos las puertas del laboratorio de visión artificial y siempre estar ahí para orientarnos y apoyarnos, ustedes fueron una parte fundamental en el desarrollo total de este proyecto puesto que creyeron en nosotros y en nuestras ganas de siempre querer hacer bien las cosas, gracias por el espacio que nos brindaron en las reuniones del laboratorio donde afianzamos nuestros conocimientos y recibimos aportes significativos que permitieron que cada vez quisiéramos hacer las cosas de la mejor manera. Muchas gracias realmente, nos acogieron de la mejor manera.

A los compañeros y amigos del Laboratorio de visión artificial, Bladimir, Sofía, Agustin, Edwin, Rodrigo y Daniel, gracias por apoyarnos y aportar de diversas maneras a que todo culminara de la mejor manera, gracias por sus explicaciones y los momentos agradables que pasamos juntos, cada uno de ustedes aportó de alguna manera a nuestro proyecto.

A Wilfredo Alfonso, que con sus observaciones permitió que el desarrollo final de este trabajo de grado fuera un éxito.

A nuestros profesores porque sin sus enseñanzas no hubiéramos tenido bases sólidas para culminar nuestro proyecto.

Agradecimientos de Euclides Barandica

- A Lina Marcela García agradezco, su total compromiso, compañerismo, comprensión, dedicación, responsabilidad y paciencia que tuvo en el desarrollo de este trabajo de grado, el cual nos permitirá obtener el título de ingenieros topográficos, eres una gran amiga y compañera, estoy orgulloso de compartir este logro junto a ti.
- A mi padre Euclides Barandica agradezco la dedicación y el esmero con que trabajó todos los días para permitirme realizar esta carrera universitaria, además de ser mi ejemplo de vida, mi amigo y compañero desde que era un niño, ya que con su convicción logró hacer de mí un hombre respetable y un profesional, como siempre lo soñó. Gracias papá por todo, espero ser como tú algún día.
- A mi madre Elenis Zemanate, quien me ayudó todos los días, por su paciencia, su dedicación y principalmente por el amor que me demostró en cada ocasión cuando creí que no lo iba a lograr. Gracias madre, porque sé que te esforzaste más que yo para lograr este sueño.
- A mi hermana Jennifer agradezco su compañía total, inclusive en mis desvelos, además de su apoyo y ayuda incondicional.
- A mi novia Lorena Gómez, quien ha sido una de las personas más importantes a lo largo de mi recorrido en la universidad, has compartido todo a mi lado; mis triunfos y derrotas, estuviste a mi lado el día que entré a la Universidad y espero me acompañes el día en el que este sueño se complete. Gracias amor; eres mi motor.
- A Junior Barandica, quien fue uno de los impulsores de mi estancia en la universidad, demostrando que sí pudimos salir adelante. Gracias primo.
- A mi hermana Stefany, que siempre me apoyó durante el desarrollo de mi carrera universitaria. Gracias.
- A mi familiares; estuvieron pendientes siempre a lo largo de mi estancia en la universidad, tíos, tías, abuelas, primos, agradezco en el alma todo su apoyo, gracias por creer en mí.
- A Dios agradezco pues es el compañero que ha permitido brindarme esta alegría y sin él este sueño no sería posible.
- A mis amigos que siempre me acompañaron y apoyaron para que terminara mi sueño. Gracias Hernán, Aldemar y Diego.

Agradecimientos de Lina Marcela García

- A mi compañero de trabajo de grado Euclides por haber afrontado junto a mi este proyecto y por haber dado lo mejor de si, por su capacidad para afrontar las dificultades y por su compromiso para que todo saliera de la mejor manera. Gracias por la amistad brindada.
- A mis padres por ser mi ejemplo de vida y ese apoyo constante, por haberme enseñado cómo afrontar los retos en mi vida, por siempre inculcarme la importancia de formarme como profesional, por demostrarme que siempre se puede salir adelante y por dar todo de ustedes para formarme como una persona integral en busca de la excelencia y del buen desempeño en los diferentes aspectos, este es uno de los muchos reconocimientos que les haré. Los amo.
- A mi sobrina Luisa Valeria porque siempre querré enseñarte lo mejor, ser para ti un motivo de orgullo como tú lo eres para mí, gracias por acompañarme muchas veces a la universidad y por felicitarme por mis logros.
- A mis hermanas Diana y Viviana, siempre han sido mi ejemplo, de ustedes he tomado la perseverancia y las ganas de siempre hacer las cosas bien.
- A Sergio por estar ahí cuando sentía desfallecer por brindarme tu amor y siempre darme fuerzas para no rendirme antes las adversidades.
- A mis demás familiares principalmente a mi padrino, mi tia Fabiola y Anama porque sé que desde un comienzo creyeron en mí, gracias por siempre confiar en mis capacidades y apoyarme.
- A Dios y a la Virgen por colmarme de bendiciones que se representaron en todas las personas que formaron parte de este largo camino lleno de retos.

Se presenta una propuesta para la integración de superficies tridimensionales y ortofotos sobre planos topográficos mediante técnicas de realidad aumentada, adaptadas para su manejo con datos geo-referenciados como una alternativa que facilita la interacción Humano-Máquina a través de la visualización tridimensional de diferentes entornos.

Las herramientas para visualizar e interactuar con la información geográfica, como los Entornos Geográficos Virtuales, facilitan la interpretación de datos espaciales, contrario a la experiencia que puede tener el usuario si se enfrenta a valores y figuras planas. La componente interactiva constituye un elemento adicional de gran importancia debido a la posibilidad de simular modificaciones en las superficies objeto de estudio.

En este proyecto se diseñó un procedimiento que permitiese la fusión entre ortofotos y nubes de puntos para su visualización geo-referenciada y estática sobre planos topográficos mediante técnicas de realidad aumentada como componente interactivo de los Entornos Geográficos Virtuales. Esto se logró a través de la alineación de los diferentes sistemas de coordenadas que intervienen en el proceso.

Se desarrolló una aplicación para integrar las superficies y los planos sobre el lenguaje de MATLAB. Se definió un protocolo de prueba y la aplicación se evaluó con una base de datos compuesta por nubes de puntos y ortofotos de un sector del municipio de Versalles, departamento del Valle del Cauca.

La evaluación se realizó con un enfoque cualitativo con el fin de determinar cómo es la interacción Humano-Máquina a través de diferentes características de los elementos virtuales utilizados como: la apariencia, luminosidad requerida, precisión de la integración, interacción, entre otros; y un enfoque cuantitativo para establecer la precisión de la visualización generada por el procedimiento de integración y evaluar el tiempo de ejecución del sistema en los diferentes modos.

Las pruebas arrojaron un buen resultado en la integración de superficies y ortofotos. Un desempeño del 91.48 % de satisfacción para imágenes estáticas en la introducción de la superficie virtual en la cartografía y un error promedio de posicionamiento de $(+/-)6^{\circ}$ en azimuth y $(+/-)3.5^{\circ}$ en elevación. Un tiempo de ejecución de máximo 15 segundos por procesamiento de una imagen.

Como trabajo futuro se propone el desarrollo de un Entorno Geográfico Virtual que integre las bases de datos, las herramientas de modelado y de simulación a través de un componente interactivo.

1 Introducción

La realidad aumentada (RA) es una variación de los ambientes virtuales o realidad mezclada, que permite al usuario percibir un entorno real con inserción de objetos virtuales (Nájera Gutierrez, 2009). Esta cuenta con ciertas características que la definen como tal, combinación de objetos virtuales con el mundo real, interacción con el usuario y visualización de objetos en tres dimensiones. De igual manera presenta una excelente calidad visual manteniendo la forma original de los objetos como una premisa de trabajo (Olalde et al., 2013).

El desarrollo tecnológico ha llevado a que diferentes profesionales visualicen y representen sus ideas, lo que se ha logrado en parte con imágenes digitales y creación de objetos tridimensionales implementados en sistemas que simulan un espacio, como son las tecnologías de diseño asistidos por computadora, CAD; pero éstos no representan el mundo real y sus diferentes perspectivas (Lara and Villarreal, 2004). Las tecnologías de diseño CAD son la base de los modelos virtuales, que corresponden en similitud a las estructuras originales en el medio real, por lo cual son la plataforma principal para el cambio de características físicas de los objetos en formato virtual (Fonseca et al., 2014).

La importancia de insertar superficies tridimensionales virtuales a través de realidad aumentada radica en la necesidad de facilitar su caracterización, al igual que la interacción entre superficie-usuario, todo esto a través de metodologías de hardware de bajo coste (*Lin et al., 2013*), lo que se encuentra inmerso en las nuevas herramientas de análisis geográfico del siglo XXI, los *Entornos Geográficos Virtuales*. Los *Entornos Geográficos Virtuales* están compuestos de bases de datos, modelación, simulación de componentes y un componente interactivo que en conjunto permiten la exploración de los entornos geográficos y los diversos cambios que se presentan sobre él (Liu and Hao, 2010).

La realidad aumentada considera como estructura básica para su ejecución, una captura de señales del mundo real o adquisición de las imágenes digitales en campo, las cuales se pueden realizar mediante una cámara digital convencional o imágenes aéreas, ortofotos. Para este caso específico se plantea el uso de ortofotos, seguido del proceso de correspondencia geométrica, que es conocer la posición y la perspectiva de la superficie con la cual se está trabajando; para continuar con su desarrollo, se conocen los parámetros de transformación que permiten llevar del sistema de coordenadas virtual al real, es decir, la alineación de los dos mundos; y finalmente se realiza la proyección al sistema humano permitiendo que este perciba la integración de los objetos virtuales con el entorno real.

Con este trabajo de grado se establece un procedimiento que permite la integración de superficies tridimensionales en formato CAD e imágenes de campo sobre planos topográficos, mediante técnicas de realidad aumentada, generando así una visualización del entorno real que se encuentra representado en planos. Lo anterior se realiza sobre una

plataforma compuesta por un dispositivo de captura de imágenes, un plano topográfico, una plantilla de marcadores y una unidad de procesamiento (figura 1.1). Dicha plataforma permite cohesionar el mundo real con el virtual a través de la integración de la superficie generada por un modelo de elevaciones fusionado con ortofotos que permiten establecer sus características reales.

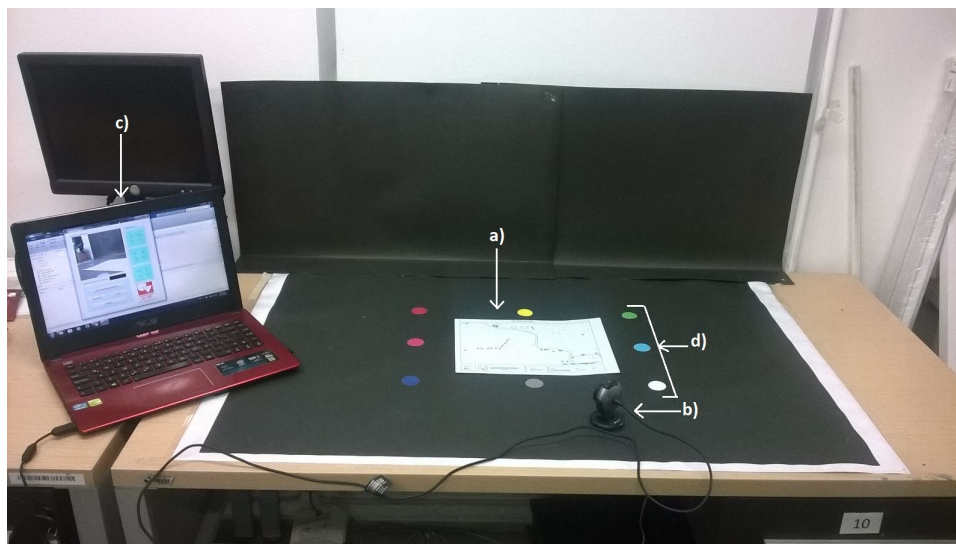


Figura 1.1: Configuración física de la plataforma: a) Plano Topográfico, b) Dispositivo de captura de imágenes, c) Unidad de procesamiento, e) Plantilla de marcadores. . Tomado de Petrasova et al. (2014)

Este documento se compone de trece capítulos cuyas temáticas se presentan a continuación:

El capítulo 2 contiene el planteamiento del problema que se resuelve en este trabajo de grado, presenta evidencias a través de las cuales se recalca la importancia del trabajo realizado y especifica las dificultades que representa la realización de éste.

El capítulo 3 contiene los objetivos generales y específicos a través de los cuales se da solución al problema planteado.

El capítulo 4 de justificación establece los beneficios del proyecto a partir de la bibliografía consultada.

El capítulo 5 correspondiente al marco conceptual que presenta las definiciones, conceptos y líneas bases que permiten soportar el desarrollo del trabajo.

El capítulo 6 presenta el marco teórico donde se define el conjunto de conocimientos considerados pilares para la realización de este trabajo. En este capítulo se abordan específicamente el modelo de la cámara, el reconocimiento de Patrones y los espacios de color.

El capítulo 7 denominado marco referencial es el resultado de una búsqueda bibliográfica que forma parte del estado del arte en las áreas relacionadas con el proyecto.

El capítulo 8 muestra el hardware del sistema desarrollado como plataforma de expe-

rimentación. En este capítulo se describen sus componentes y se definen sus funciones en el sistema.

En el capítulo 9 se describe la funcionalidad del software a través de diagramas de procesos que representan su funcionamiento.

El capítulo 10 muestra las pruebas y los resultados que permiten evaluar y validar el funcionamiento del sistema.

El capítulo 11 presenta las conclusiones del trabajo de grado a partir de los resultados obtenidos.

El capítulo 12 de limitaciones muestra los rangos de operación establecidos de acuerdo con los experimentos realizados para garantizar desempeños similares a los obtenidos en este trabajo.

Finalmente el capítulo 13 correspondiente a los trabajos futuros presenta las sugerencias que pueden llegar a abrir líneas de investigación relacionadas con el trabajo realizado.

2 Planteamiento del Problema

La realidad aumentada permite describir, analizar y caracterizar la superficie para la toma de decisiones (Ruiz et al., 2004), a través de geometría proyectiva, en las etapas de materialización, planificación, cumplimiento de diseños planteados y mantenimiento (Klinker et al., 2001), puesto que trabaja con los objetos debidamente geo-referenciados para facilitar una relación entre máquina, usuario y entorno (Coelho and Bähr, 2005). Esta relación permite su aplicación en diversas disciplinas como la medicina, manufactura y reparación, anotación y visualización, planeamiento de rutas robóticas, educación (Nájera Gutierrez, 2009), actualizaciones de bases catastrales, localización de puntos geodésicos (Coelho and Bähr, 2005), visualización de mapas en tres dimensiones (Bobrich and Otto, 2002a), entre otras.

El poder visualizar superficies virtuales permite replantear, definir y analizar la estructura de la superficie que se representa en un plano, determinando sus características y formas (Uceda, 2014) sin incurrir en un gasto significativo, pues la comprensión de la superficie se da a partir de insumos principales que representan el entorno real, como superficies en formato CAD, imágenes asociadas a ellas, ortofotos, y planos topográficos, los cuales, debidamente alineados, permiten al usuario tener una proyección coherente e interactiva del espacio.

Los factores que dificultan el proceso que se debe desarrollar para trabajar con realidad aumentada son, la oclusión, el alineamiento de los sistemas de coordenadas, y conocer la perspectiva del usuario (Ruiz et al., 2004).

En Latinoamérica el uso de realidad aumentada se impulsa en el desarrollo de actividades que facilitan el aprendizaje debido a su capacidad de interacción (Malbos et al., 2014), en las ciencias geodésicas para establecer puntos de interés con información relevante (Silva and Silva, 2012) y mejorar la interpretación de cartografía (Uceda, 2014). A nivel nacional el desarrollo de esta herramienta se ha dado en investigaciones en ciencias médicas referentes a la cardiología (Ortiz Rangel, 2011), visualización de información urbana geo-referenciada (Wilches and Figueroa, 2011) en el grupo *Imagine* de la *Universidad de los Andes*, localización de sitios turísticos en la *Universidad Nueva Granada* implementando realidad aumentada (Callejas et al., 2011) y sistemas georeferenciados de realidad aumentada con dispositivos móviles como herramienta para la *Facultad Tecnológica* de la *Universidad Distrital Francisco José de Caldas* (Leguizamón et al., 2012). En la Universidad del Valle su uso ha sido en adaptaciones robóticas y visualizaciones virtuales que se procesan en el mundo real (Vélez Melo, 2009), y simulaciones sobre el sistema respiratorio para determinar el estado actual del individuo (Hernández Muñoz and Vélez López, 2006).

Los *Entornos Virtuales Geográficos*, *VGEs*, están compuestos de bases de datos, modelado, simulación de sus componentes y un componente interactivo. La inserción de

superficies tridimensionales que representen entornos geográficos en planos es la base para trabajar con dicha herramienta de información geográfica puesto que permite una visualización interactiva facilitando el entendimiento de diversos factores o formas que intervienen y representan el terreno, contrario a lo que se puede conseguir interpretando valores y figuras planas (Chen et al., 2013). Por tanto los VGEs disminuyen la mala interpretación en los aspectos espaciales, temporales y lógicos de la información (Dong et al., 2013).

Con base en lo anterior se establece como problema objeto del presente trabajo de grado: ¿Cómo visualizar superficies CAD e imágenes de campo alineadas con planos topográficos como parte de un entorno virtual geográfico interactivo ?.

3 Objetivos

3.1. Objetivo General

Diseñar un procedimiento que permita la fusión de imágenes de campo y superficies en formato CAD para su visualización geo-referenciada y estática en planos topográficos mediante técnicas de realidad aumentada como componente interactivo de los Entornos Geográficos Virtuales.

3.2. Objetivos Específicos

- Seleccionar una metodología para la fusión de imágenes de campo y superficies en formato CAD.
- Implementar la metodología seleccionada para la fusión de imágenes y superficies.
- Desarrollar un sistema de visualización de superficies virtuales sobre un sistema de coordenadas geográfico definido por la plancha cartográfica correspondiente a la zona.
- Establecer un protocolo de prueba para evaluar el desempeño del sistema.

4 Justificación

El uso de realidad aumentada para visualizar planos topográficos mejora la experiencia del usuario, dado que permite que este acceda a las nuevas herramientas de las ciencias de computación, a través de las cuales puede integrar el entorno real con la vista de entornos geográficos tridimensionales ampliando la percepción del usuario (Bobrich and Otto, 2002b).

Las plataformas CAD permiten, gracias a su multi-formato, la conexión entre los diversos pasos de diseño arquitectónico y de la construcción (Fonseca et al., 2014). La proyección de los archivos en formato CAD a través de un sistema visual humano como lo es un monitor de computador disminuye costos de fabricación de modelos a escala y no necesita un hardware y software complejo, pues las capturas del mundo real se hacen a través de una cámara digital convencional (Yang et al., 2013).

Las ventajas que tiene la implementación de realidad aumentada desde un enfoque óptico es la simplicidad para operar debido a que no requiere hardware de alto costo, permite percibir el mundo real con un retraso mínimo en tiempo, la resolución que maneja permite apreciar la realidad sin distorsiones, y finalmente no presenta discordancias entre lo que se esta proyectando y lo que el usuario espera ver.

El uso de esta tecnología sirve como base para la visualización de proyectos futuros en su espacio de desarrollo, llenando vacíos de información entre las etapas de planificación y ejecución (Chi et al., 2013), y aportando al avance de actividades de campo relacionados con el entorno construido y la ingeniería, como son la arquitectura y diseño, paisaje y urbanismo, construcción, mantenimiento integral, actualización catastral, establecimiento de puntos geodésicos (Klinker et al., 2001), visualización de mapas tridimensionales entre otros, lo que permite predecir el impacto de la construcción en el paisaje (Sánchez and Borro, 2007).

La necesidad de adaptación y desarrollo de nuevas tecnologías que mejoren los métodos convencionales han llevado a que tanto la industria como las universidades estén tratando de aumentar sus programas de investigación hacia la realidad aumentada, puesto que su integración contribuye a la disminución de errores, planificación inteligente y eficiencia del proyecto, lo que permite aumentar y facilitar la productividad general (Wang, 2006).

La interpretación de la superficie terrestre a partir de los planos topográficos que la representan con realidad aumentada es uno de los componentes interactivos de los *Entornos Geográficos Virtuales*, que aportan a la evolución de las herramientas y por tanto la integración de la información de la ciencia de información geográfica (Lin et al., 2013). Presentar una superficie virtual cohesionada con el entorno real permite introducir el concepto de cybermapa, este despierta intereses de carácter académico en el ámbito interactivo de los entornos geográficos virtuales (Jun, 2001).

El desarrollo completo de un entorno geográfico virtual permite la simulación de los

fenómenos y que el usuario proyecte planes de mejora y prevención de desastres.

El uso de realidad aumentada también ha incursionado en los ambientes geoespaciales, por lo tanto que la OGC, Open Geospatial Consortium, que establece los estándares de servicios y contenido espacial, ha definido un estándar para la implementación de realidad aumentada en escenas georeferenciadas a través de dispositivos móviles, denominado ARML, Augmented Reality Markup Language, el cual se estableció a finales del 2012. Este describe la escena, los objetos y su comportamiento en lenguaje XML (Lechner, 2013)

5 Marco conceptual

Para abordar la inserción de objetos virtuales en el mundo real a través de realidad aumentada es pertinente presentar algunos conceptos que permitan establecer conexiones e interpretaciones que faciliten su comprensión. Por tanto, a continuación, se presentan las temáticas que según la literatura consultada, conforman una secuencia para la inserción de superficies tridimensionales virtuales en planos topográficos a través de realidad aumentada.

5.1. Visión Artificial

La visión artificial es la rama de la inteligencia artificial que emula la percepción visual humana de los objetos que lo rodean a través de dispositivos electrónicos. Percibe las estructuras del mundo tridimensional a partir de imágenes bidimensionales captadas por sensores, teniendo en cuenta sus propiedades geométricas y de localización en el espacio.

5.1.1. Realidad Aumentada

Esta es considerada el conjunto de tecnologías con el cual pueden visualizarse, en el mundo real, objetos que se encuentran interpretados en el mundo virtual. Es de gran importancia tener en cuenta que la realidad aumentada difiere en gran parte de la realidad virtual, puesto que esta última trabaja en un entorno donde predomina el mundo virtual. El conjunto de tecnologías consideradas fundamentales, que permiten contribuir al desarrollo de inserción de objetos geo-referenciados con realidad aumentada son, una base de datos, las tecnologías de localización, los dispositivos portátiles y móviles y la interfaz del usuario.

La estrategia básica para visualizar objetos virtuales en el mundo real por medio de realidad aumentada se plantea en la Figura 5.1. Inicialmente se realiza una adquisición de imágenes digitales. Estas imágenes se procesan para encontrar correspondencias geométricas que permiten estimar la posición y orientación que tiene el usuario. Posteriormente se estiman los parámetros de transformación que permiten llevar de un sistema de coordenadas a otro, es decir, la alineación de los dos mundos. Finalmente se realiza la visualización, permitiendo que el usuario perciba la integración de los objetos virtuales en el entorno real (Lara and Villarreal, 2004).

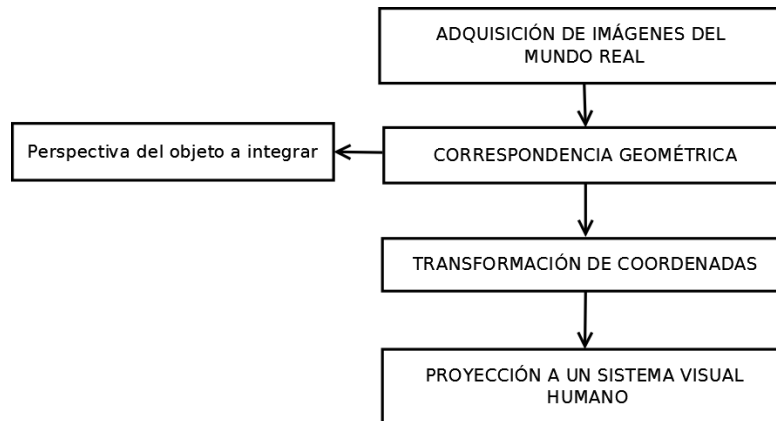


Figura 5.1: Diagrama general para la implementación de realidad aumentada.

La realidad aumentada se puede categorizar por diferentes tipos, como se establece en el Cuadro 5.1. El entorno hace referencia al espacio en el cual se da su implementación, *indoor* para espacios cerrados y *outdoor* para exteriores. En cuanto a la extensión se puede establecer que ésta se realiza en espacios acotados o *locales*, y en espacios amplios o *generales*. La movilidad con la que puede contar un sistema de realidad aumentada hace que pueda ser: *móvil*, es decir, que puede ser transportado, o *espacial* cuando considera un espacio concreto. Finalmente se evalúa la capacidad que puede ser *individual* si está dispuesto a ser visto y manejado por un solo usuario, o *colaborativo* si es visualizado por un conjunto de personas que pueden interactuar entre sí (Uceda, 2014) .

Cuadro 5.1: Categorización por tipo de implementación en realidad aumentada.

Entorno	Extensión	Movilidad	Cant. de usuarios
Indoor	Locales	Móvil	Individual
Outdoor	Generales	Espacial	Colaborativo

5.2. Entornos Virtuales Geográficos

Los *Entornos Virtuales Geográficos* son una nueva herramienta de información geográfica. Está compuesta por bases de datos, modelado, simulación de sus componentes y un componente interactivo, a través de los cuales se caracteriza, evalúa, simula y comprende la superficie terrestre y los diferentes fenómenos que en ésta intervienen. Esta herramienta permite mejorar la capacidad de reconocimiento y la percepción que se tiene del entorno representado, pues trabaja con conocimientos de diferentes disciplinas relacionadas con la informática y la geografía.

5.3. Planos Topográficos

Con éstos puede representarse un terreno a una escala determinada sin considerar la curvatura de la superficie terrestre. Generalmente en éste se establecen las curvas de nivel que representan la forma del terreno, los cuerpos de agua existentes, carreteras, vías férreas, puentes y obras construidas por el hombre entre otros fenómenos presentes.

5.4. Transformaciones Geométricas

Las transformaciones geométricas permiten encontrar puntos correspondientes entre dos sistemas de coordenadas. Las transformaciones mas usuales son: traslación, rotación, simetrías y transformaciones afín, a través de las cuales puede variar el tamaño y la posición de dichos sistemas.

5.4.1. Sistema de Coordenadas

Se conoce como sistema de coordenadas a un conjunto de valores que permiten establecer la posición de un punto en el espacio euclideo. En realidad aumentada se trabajan tres sistemas de coordenadas, el del dispositivo de captura de imágenes, el de la imagen y el del mundo real, como se presenta en la Figura 5.2, los cuales deben alinearse para dar la sensación de que todo lo que se percibe se encuentra en un mismo entorno espacial.

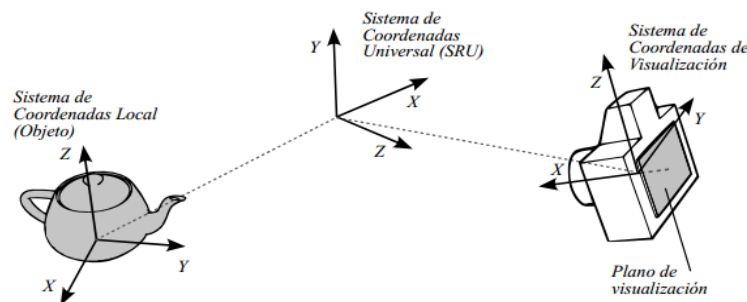


Figura 5.2: Sistemas coordenados en realidad aumentada.Tomado de Gonzáles et al. (2011)

5.4.2. Coordenadas Homogéneas o Projectivas

Las coordenadas homogéneas son aquellas que a través de productos de matrices representan transformaciones geométricas, facilitando las operaciones que pretenden alinear otros sistemas coordenados. Las transformaciones más utilizadas son rotación, traslación y escalamiento.

5.4.3. Proyección Perspectiva

La proyección perspectiva es aquella que se realiza de un objeto tridimensional a una superficie bidimensional a través de líneas rectas que se generan a través un único punto, que recibe el nombre de centro óptico o de proyección. Dicho principio permite establecer el modelo geométrico del dispositivo de captura de imágenes. La Figura 5.3 representa la proyección que se realiza de un objeto en el espacio sobre un plano.

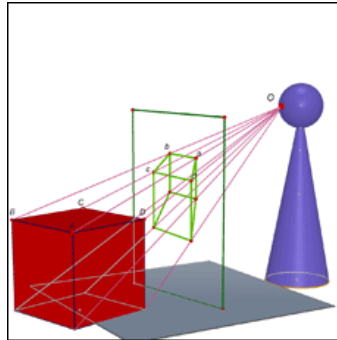


Figura 5.3: Proyección de un objeto sobre un plano.Tomado de Aliaga (2014)

5.5. Calibración

La calibración consiste en el procedimiento que se lleva a cabo para conocer del modelo geométrico, el valor de los parámetros intrínsecos y extrínsecos del dispositivo de captura de imágenes, lo que permite realizar transformaciones de los sistemas coordenados entre los diferentes entornos: real, objeto y dispositivo de captura.

5.5.1. Parámetros Intrínsecos

Se establecen como parámetros intrínsecos del dispositivo de captura de imágenes a aquéllos que son invariantes mientras se mantengan constantes las características y posiciones existentes entre la óptica y el sensor de captura de imágenes; éstos son: distancia focal, factor de escala, distorsión y posición del punto principal.

5.5.2. Parámetros Extrínsecos

Los parámetros extrínsecos son aquellos que permiten relacionar el sistema coordenado del dispositivo de captura de imágenes y el sistema coordenado del mundo, especificando su orientación y posición respecto al entorno real.

5.6. Modelos Existentes de la Superficie

Estos modelos permiten representar diversas entidades geométricas que pueden ser estructuras alámbricas, de superficies y solidas, las cuales hacen referencia respectivamente

a modelos sin propiedades físicas, modelos donde su importancia es de carácter visual y aquéllos que poseen información física. Cuentan con soportes de la información geométrica que permiten su posicionamiento, es decir, geo-referenciar los objetos asignando coordenadas espaciales a la información que se encuentra en un sistema de posicionamiento arbitrario, consiguiendo que éste quede con un sistema de coordenadas geográficas en un sistema de referencia específico.

Los modelos de diseño asistido por computador permiten representar escenas, superficies e imágenes, las cuales se pueden modificar, analizar y caracterizar.

Algunos de los modelos de la superficie son representados por medio de nubes de puntos, las cuales representan la superficie a través de conjuntos de vértices en sistema de coordenadas tridimensional.

5.7. Técnicas de Visualización

En realidad aumentada se implementan diversos dispositivos como sistemas de visualización que permiten que el usuario perciba dentro de un mismo contexto el mundo real y virtual. Algunos de ellos que han sido usados son: cascos de realidad virtual o HDMS, según sus siglas en inglés, ordenadores de bolsillo o PDA, TabletPC, entre otros, que permiten procesar las señales que son recibidas para establecer su ubicación en el mundo real (GPS).

Estos dispositivos visuales varían respecto al tipo de aplicación en la cual se van a emplear. Parte de los componentes de hardware que se emplean para poder llevar a cabo la visualización son:

- Sistema de visualización, por pantalla o display.
- Sistema de localización, por seguimiento o rastreo (tracking) y dirección, a través de sistemas de geoposicionamiento global GPS en exteriores y en interiores por tecnologías magnéticas u ópticas.
- Dispositivos de captura de imágenes. o sea cámara
- Procesador de tareas.

5.8. Tracking o Seguimiento

El tracking o seguimiento hace referencia a las tecnologías a través de las cuales se establece el adecuado seguimiento de los objetos virtuales en el entorno real, lo cual se garantiza si se tiene en cuenta marcas o patrones de identificación de un entorno respecto al otro, así como también una adecuada localización de los objetos que interactúan en el entorno y finalmente el correcto seguimiento del campo de visión del usuario.

Los sistemas de seguimiento se basan en sensores de localización, técnicas de visión, y algunos son el resultado de combinar estos dos. Aquellos sistemas que hacen uso de sensores pueden ser mecánicos, ópticos, inerciales, acústicos y/o magnéticos. La localización

se realiza a través de dispositivos como smartphones o tablets, que cuentan con unidades GPS o sensores inerciales conocidos como acelerómetros, y la dirección del usuario se establece por los sensores magnéticos e inerciales. Los sistemas basados en técnicas de visión realizan seguimiento de marcas fiduciales, patrones o marcadores, los cuales se pueden establecer con mayor facilidad en espacios cerrados.

6 Marco Teórico

6.1. Modelo de la Cámara

La geometría proyectiva es una rama de las matemáticas a través de la cual se busca solucionar los problemas de perspectiva que se presentan cuando se representan objetos planos en el espacio. En su desarrollo se considera renombrar ciertos términos geométricos como la longitud y el ángulo, que al ser transformados y evaluados por diferentes perspectivas pasan a ser sustituidos por otros términos de incidencia (Aliaga, 2014).

La geometría proyectiva considera como subgeometrías aquellas que han sido desarrolladas con anterioridad: la geometría afín, la geometría euclidiana y la geometría no euclidiana.

Los sistemas de coordenadas que intervienen en la adquisición de una imagen y que se encuentran en el espacio euclidiano son:

- Sistema de coordenadas del mundo real, en el cual se reconocen medidas en unidades métricas y se expresa asignando valores de X, Y, Z .
- Sistema de coordenadas del dispositivo de captura de imágenes, que se establece en unidades métricas, y se expresa como x, y, z .
- Sistema de coordenadas de la imagen, este se basa en píxeles y se expresa como u, v .

El sistema de proyección del dispositivo de captura de imágenes es representado geométricamente a través del modelo de cámara Pinhole (ecuación 6.1), el cual trabaja bajo la premisa que la imagen es la proyección del objeto capturado desde un mismo punto, también denominado foco. Su sistema de coordenadas considera un origen F . Los ejes (F, x) y (F, y) son paralelos a la dirección de los píxeles de la imagen; el eje óptico (F, z) , es perpendicular al plano de la imagen y su orientación es referente a la escena. (Moldovon and Wada, 2004)

$$w \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ t \end{bmatrix} K \quad (6.1)$$

Donde

w representa el factor de escala arbitrario.

K representa la matriz de parámetros intrínsecos de la cámara. Esta matriz se define en la sección 6.1.2.

R representa la matriz de rotación tridimensional de la cámara. Esta matriz se define en la sección 6.1.2.1.

t representa la matriz de traslación de la cámara con relación al sistema de coordenadas del mundo. Esta matriz se define en la sección 6.1.2.1.

El modelo de cámara Pinhole genera la proyección de un punto en el espacio, $B = (X, Y, Z)$, a través del centro óptico, en una imagen, donde pasa a ser $b = (u, v)$ que representan valores de filas y columnas, como se aprecia en la Figura 6.1.

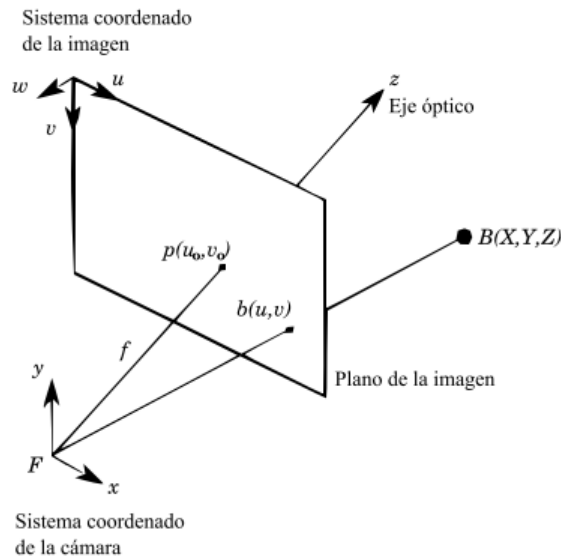


Figura 6.1: Modelo de Pinhole. Tomado de Nájera Gutierrez (2009)

6.1.1. Transformación del Sistema Coordinado

Para poder insertar objetos virtuales en el mundo real es necesario tener en cuenta las transformaciones de los diversos sistemas coordenados con los que cuenta cada uno de los componentes, considerando que la transformación consiste en cambiar de posición los ejes de referencia de un sistema a otro.

Existen dos transformaciones de coordenadas que se deben llevar a cabo, la transformación de sistema coordenado del mundo - dispositivo de captura de imágenes y transformación del dispositivo de captura de imágenes - imagen, como se ilustra en la Figura 6.2.

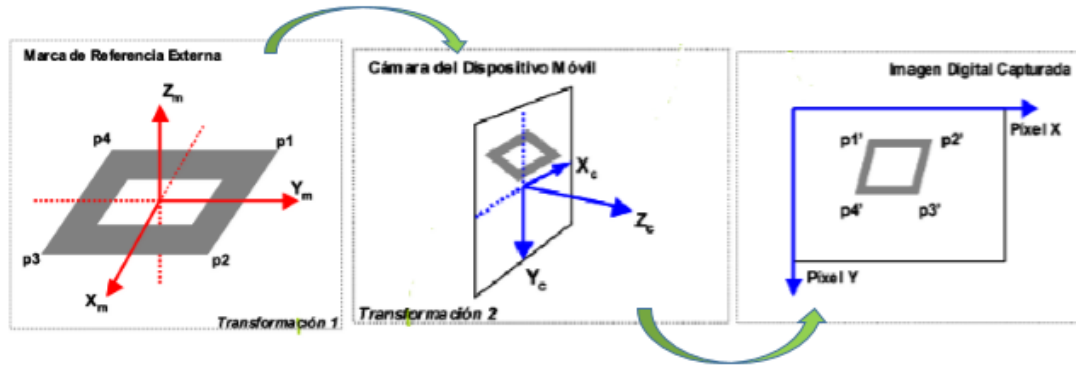


Figura 6.2: Transformaciones de sistemas de coordenadas.. Tomado de Roncagliolo et al. (2007)

6.1.2. Transformación del Sistema Coordinado del Dispositivo de Captura de Imágenes al Sistema Coordinado de la Imagen

Como puede observarse en la Figura 6.1, la proyección de un punto en el espacio B sobre un plano imagen genera un punto b . En esta transformación intervienen los parámetros u^0, v^0, w^0 que definen las coordenadas del Foco y k_u y k_v que determinan los factores de escala horizontal y vertical respectivamente, cuyas unidades están dadas en píxeles/mm, (ecuación 6.2). Cabe resaltar que se implementan dos factores de escala puesto que los píxeles generalmente tienden a ser rectangulares.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u^0 \\ v^0 \\ w^0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Donde

u, v, w representan las coordenadas de b en el sistema coordinado de la imagen.

x, y, z representan las coordenadas de el dispositivo de captura imágenes.

Los valores de y' y z' se multiplican por -1, puesto que se encuentran en el sentido contrario a sus valores correspondientes en el sistema coordinado de la imagen, que son v y w respectivamente, como se aprecia en la Figura 6.1. La variable w es nula puesto que la imagen es un espacio bidimensional. Finalmente la matriz que representa el cambio de coordenadas del espacio proyectivo dispositivo de captura a la imagen se define por la ecuación 6.3 que se presenta a continuación:

$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

donde el factor de escala vertical es s y k se define por la ecuación 6.4(Taketomi et al., 2013).

$$k = \begin{bmatrix} -k_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

6.1.2.1. Parámetros Intrínsecos

Para poder determinar el sistema geométrico del dispositivo de captura de imágenes (x, y, z) es necesario conocer sus parámetros intrínsecos y extrínsecos; este sistema permite establecer su relación con las coordenadas de la imagen (u, v) , ecuación 6.5. Los parámetros intrínsecos se obtienen del producto de la matriz K , la cual define la transformación del dispositivo al plano de la imagen, y la matriz P , considerada una proyección perspectiva a la cual se le ha realizado una transformación afín, (ecuación 6.6).

$$u = k_u \frac{f_x}{z} + u_0, \quad v = -k_v \frac{f_y}{z} + v_0 \quad (6.5)$$

$$kP = \begin{bmatrix} k_u & 0 & 0 & u_0 \\ 0 & -k_v & 0 & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & \frac{u_0}{f} & 0 \\ 0 & -k_v & \frac{v_0}{f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 0 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

El producto de kP se multiplica por f , lo cual no afecta a la matriz puesto que las coordenadas se ven sometidas a la aplicación de un factor común, obteniendo la ecuación 6.7, que representa una aplicación lineal del espacio proyectivo. (Hartle and Zisserman, 2004)

$$I_c = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Donde

α_u es el factor de escala horizontal multiplicado por el factor f , $\alpha_u = k_u f$

α_v es el factor de escala vertical multiplicado por el factor f , $\alpha_v = k_v f$

Al generar las coordenadas de la cámara sin sus dimensiones en x_c , y_c y z_c , se obtiene que $x_c = x/z$, $y_c = y/z$ y $z_c = 1$, lo cual permite describir la relación entre el sistema de coordenadas de la imagen y el dispositivo de captura de imágenes, con las ecuaciones 6.8 y 6.9, que se puede representar en forma matricial como se presenta en la ecuación 6.10.

$$u = \alpha_u x_c + u_0 \text{ con } \alpha_u < 0 \quad (6.8)$$

$$v = \alpha_v x_c + v_0 \quad (6.9)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}$$

donde

$$C = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Por tanto la matriz I_c de los parámetros intrínsecos, está compuesta de una transformación afín entre el dispositivo de captura de imágenes y las imágenes, C , ecuación 6.10, y una transformación proyectiva que se presenta en la ecuación 6.11a continuación:

$$I_c = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

6.1.2.2. Parámetros Extrínsecos

Para establecer los parámetros extrínsecos del modelo geométrico del dispositivo de captura de imágenes se trabaja a partir de un objeto de referencia con coordenadas conocidas en el mundo real, el cual se denomina mira de calibración. En la Figura 6.3 se presenta gráficamente el proceso de determinación de los parámetros extrínsecos de un dispositivo de captura de imágenes.

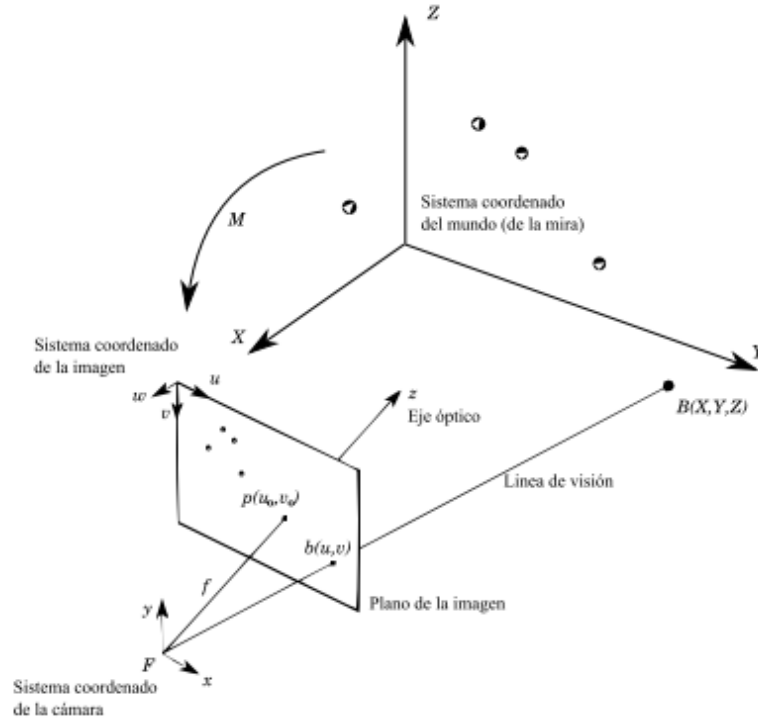


Figura 6.3: Parámetros extrínsecos de la cámara. Tomado de Patrone (2013)

Los parámetros extrínsecos pueden ser conocidos por medio de dos procesos de transformación y uno de proyección, los primeros son referentes a la mira de calibración-imagen, y dispositivo de captura-imagen, donde la transformación de la mira de calibración a la imagen se realiza mediante la ecuación 6.12, compuesta de tres rotaciones y tres traslaciones.(Malek and Belhocine, 2011)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Donde

x, y, z , sistema coordenado de la imagen.

X, Y, Z , sistema coordenado de la mira de calibración.

r representan las rotaciones que se aplican al sistema coordenado de la mira de calibración.

t representan las traslaciones para llegar del sistema coordenado de la mira a la imagen.

La Ecuación 6.12 se establece como una transformación rígida con seis grados de libertad, es decir que presentan rotaciones y traslaciones sobre los ejes x, y y z , dando como resultado una matriz denominada A , la cual se representa en coordenadas homogéneas, (ecuación 6.13).

$$A = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^t & 1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

La matriz A representa una transformación de seis grados de libertad, pues presenta rotaciones y traslaciones para cada uno de sus ejes, y los elementos que la componen se denominan parámetros extrínsecos.

6.1.3. Transformación del Sistema Coordenado del Mundo Real al Sistema Coordenado del Dispositivo de Captura

Al haber establecido los parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo de la cámara es factible realizar la transformación del sistema coordenado del mundo al dispositivo de captura de imágenes, por medio de la Ecuación 6.14, que representa finalmente una proyección perspectiva a través de la Ecuación 6.16.

$$M = I_C A \quad (6.14)$$

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

$$M = \begin{bmatrix} \alpha_u r_1 + u_0 r_3 & \alpha_u t_x + u_0 t_z \\ \alpha_u r_2 + v_0 r_3 & \alpha_u t_y + v_0 t_z \\ r_3 & t_z \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

6.1.4. Calibración

Para conocer el valor de los parámetros intrínsecos y extrínsecos se deben estimar los coeficientes de la matriz de proyección perspectiva M con la ecuación 6.16, la cual establece los puntos de la mira de calibración y su respectiva proyección en la imagen. Cada punto establecido por (X_i, Y_i, Z_i) se proyecta en (u_i, v_i) , lo que es reescrito como combinaciones lineales en las Ecuaciones 6.17 y 6.18 de los parámetros m_{ij} .

$$X_i m_{11} + Y_i m_{12} + Z_i m_{13} + m_{14} - u_i X_i m_{31} - u_i Y_i m_{32} - u_i Z_i m_{33} = u_i m_{34} \quad (6.17)$$

$$X_i m_{21} + Y_i m_{22} + Z_i m_{23} + m_{24} - v_i X_i m_{31} - v_i Y_i m_{32} - v_i Z_i m_{33} = v_i m_{34} \quad (6.18)$$

Por tanto se obtiene un sistema homogéneo de $2n$ ecuaciones para n puntos, que se representan matricialmente como la Ecuación 6.19:

$$K_{2n \times 11} x_{11} = u_{2n} \quad (6.19)$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$\begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i X_i & -u_i Y_i & -u_i Z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -v_i X_i & -v_i Y_i & -v_i Z_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \\ m_{24} \\ m_{31} \\ m_{32} \\ m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ u_i m_{34} \\ v_i m_{34} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Un método de calibración que permite establecer los valores de los parámetros intrínsecos y extrínsecos que componen la matriz M , (método Faugeras-Toscani) se presenta a continuación.

6.1.4.1. Método Faugeras-Toscani

Este método contempla su implementación en la realidad puesto que no considera que $m_{34} = 1$ y por tanto representa los problemas de calibración que generalmente se presentan, lo que conlleva a que la Ecuación 6.19 sea redefinida por la Ecuación 6.21 :

$$B_{2nx9}x_9 + C_{2nx3}X_3 = 0 \quad (6.21)$$

Donde, es

$$B_{2nx9} = \begin{bmatrix} & & & & \cdots & & & & \\ X_i & Y_i & Z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & Y_i & Z_i & 1 & -v_i \\ & & & & \cdots & & & & \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

$$x_9 = [m_1 \quad m_{14} \quad m_2 \quad m_{24} \quad m_{34}] \quad (6.23)$$

$$C_{2nx3} = \begin{bmatrix} & & \cdots & \\ -u_i X_i & -u_i Y_i & -u_i Z_i \\ -v_i X_i & -v_i Y_i & -v_i Z_i \\ & & \cdots & \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

$$x_3 = [m_3]^t \quad (6.25)$$

Surge un problema de optimización a partir de que la matriz de rotación formada por r_1, r_2 y r_3 es ortonormal, establecido en la ecuación 6.26. Este debe optimizarse a través del método de mínimos cuadrados.

$$Q = \|B_{2nx9}x_9 + C_{2nx3}X_3\|^2 \quad (6.26)$$

La Ecuación 6.25 se puede reescribir al considerar que r_3 es un vector director, por tanto se cumple lo planteado en la Ecuación 6.27 .

$$\|r_3\|^2 = \|m_3\|^2 = 1 \quad (6.27)$$

Al utilizar multiplicadores de Lagrange, en la Ecuación 6.28 considerada como restricción en el criterio Q y considerando que las derivadas parciales respecto a x_9 y x_3 son nulas, se obtienen las Ecuaciones 6.29 y 6.30.

$$Q = \|B_{2nx9}x_9 + C_{2nx3}X_3\|^2 + \lambda (1 - \|x_3\|^2) \quad (6.28)$$

$$B^t B x_9 + B^t C x_3 = 0 \quad (6.29)$$

$$C^t C x_3 + C^t B x_9 - \lambda x_3 = 0 \quad (6.30)$$

A partir de las cuales se establece,

$$x_9 = -(B^t B)^{-1} B^t C x_3 \quad (6.31)$$

$$D = C^t C - C^t B (B^t B)^{-1} B^t C \quad (6.32)$$

Lo que finalmente conlleva a que el criterio de optimización dado por la Ecuación 6.26, adopte el valor de la Ecuación 6.33.

$$Q = x_3^t + D x_3 = \lambda \quad (6.33)$$

Se establece que D es una matriz simétrica, cuyos valores son reales y positivos, que se encuentra con su vector propio x_3 y asociado a una variable λ . Por tanto para poder determinar el valor de x_3 y darle solución al sistema de ecuaciones se presenta el siguiente procedimiento:

- Calcular los valores propios de la matriz de 3x3, D .
- Establecer el valor que minimiza Q , que corresponde al valor propio menor.
- Garantizar que $m_{34} = t_z > 0$, para considerar que la mira de calibración se encuentra delante de la cámara.
- Calcular y normalizar el vector propio x_3 .
- Calcular el vector x_9 .

Este método de calibración sugiere al menos seis correspondencias de los puntos bidimensionales y tridimensionales, lo que garantiza exactitud en los resultados de calibración y una mínima carga computacional.

6.1.4.2. Método de Calibración de Heikkilä y Silven

El método de calibración de (Heikkilä and Silven, 1997) se basa en el modelo de Pinhole, sección 6.1, pero este considera los componentes de distorsión radial y tangencial. Este método estima inicialmente los parámetros lineales, ecuación 6.20, seguido de una estimación no lineal, luego una corrección para la proyección asimétrica y finalmente la corrección de la imagen.

Este método arroja en vector T de tamaño 1x3 el cual contiene la posición de la cámara respecto al origen de coordenadas del mundo real y tres valores de ángulos de Euler ω, φ, k , los cuales permiten calcular la matriz de rotación R de tamaño 3x3.

Donde T es el vector de traslación que tiene la información de la posición de la cámara en 3D, ecuación 6.34 y R es la matriz de rotación con información de m_{11} hasta m_{31} , ecuación 6.35, valores que se obtienen a partir de los ángulos de Euler.

$$T = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

$$R = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (6.35)$$

donde:

$$m_{11} = \cos\varphi \cos k$$

$$m_{12} = \sin\omega \sin\varphi \cos k - \cos\omega \sin k$$

$$m_{13} = \cos\omega \sin\varphi \cos k + \sin\omega \sin k$$

$$m_{21} = \cos\varphi \sin k$$

$$m_{22} = \sin\omega \sin\varphi \sin k + \cos\omega \sin k$$

$$m_{23} = \cos\omega \sin\varphi \sin k - \sin\omega \cos k$$

$$m_{31} = -\sin\varphi$$

$$m_{32} = \sin\omega \cos\varphi$$

$$m_{33} = \cos\omega \cos\varphi$$

A continuación se presenta la expresión que representa la proyección de un punto en el espacio sobre la imagen, a través del modelo de cámara de Pinhole, ecuación 6.36.

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \frac{f}{z_i} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (6.36)$$

donde (x_i, y_i, z_i) , es el punto en el plano de la imagen y f es la longitud focal.

$$\begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u s_u \tilde{u}_i \\ D_v \tilde{v}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

donde D_u, D_v son los valores para el cambio entre las unidades métricas y los píxeles, se deben de extraer de los parámetros dados por el fabricante de la cámara, s_u es el factor de escala ~ 1 y finalmente u_0, v_0 son los valores del punto principal de la cámara.

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(r)} \\ \delta v_i^{(r)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_i (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + \dots) \\ \tilde{v}_i (k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4 + \dots) \end{bmatrix}$$

donde k_1, k_2 , son los coeficientes de distorsión radial y $r_i = \sqrt{\tilde{u}_i^2 + \tilde{v}_i^2}$.

$$\begin{bmatrix} \delta u_i^{(t)} \\ \delta v_i^{(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 \tilde{u}_i \tilde{v}_i + p_2 (r_i^2 + 2\tilde{u}_i^2) \\ p_1 (r_i^2 + 2\tilde{v}_i^2) + 2p_2 \tilde{u}_i \tilde{v}_i \end{bmatrix}$$

donde p_1, p_2 , son los coeficientes de distorsión tangencial.

Finalmente las coordenadas de la imagen se representan con la sumatoria de los valores hallados previamente.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u s_u(\tilde{u}_i + \delta u_i^{(r)} + \delta u_i^{(t)}) \\ D_v(\tilde{v}_i + \delta v_i^{(r)} + \delta v_i^{(t)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

6.2. Reconocimiento de Patrones

Se define como reconocimiento de patrones a la clasificación de datos basada en el conocimiento adquirido de patrones, lo que requiere procesos de medición, validación, procesamiento e interpretación de la información obtenida, permitiendo automatizar procesos que aportan a la interpretación el mundo real. Algunos de los enfoques usados para resolver problemas de reconocimiento de patrones son: reconocimiento estadístico de patrones, reconocimiento sintáctico de patrones, redes neuronales y reconocimiento lógico combinatorio (Carrasco and Martínez, 2011).

6.2.1. Redes Neuronales

Se considera como una técnica de aprendizaje que surge de emular los sistemas biológicos, los cuales se considera clasificadores naturales de patrones. Los clasificadores por redes neuronales basan su funcionamiento en la estructura que presentan las neuronas, es por esto que se compone de un conjunto de entradas, las cuales son procesadas en el núcleo y que posteriormente emiten una salida como resultado, como se representa en la figura 6.4. La conexión entre diferentes neuronas permite llevar a cabo tareas complejas a través de procesamientos que no requieren mayor peso computacional (Murty and Devi, 2011).

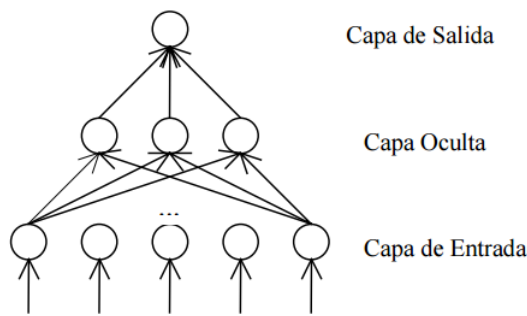


Figura 6.4: Estructura de una red neuronal

Una de las estructuras neuronales más usadas en problemas de clasificación corresponde a redes multicapa de conexiones hacia adelante, entrenadas con algoritmos de retropropagación (Murty and Devi, 2011)(Nájera Gutierrez, 2009)(Ripley, 1996).

6.3. Espacios de Color

Se define como espacio de color a los métodos empleados para poder especificar, crear y visualizar las características de los colores en una imagen. Estos métodos caracterizan los colores a través de representaciones matemáticas tridimensionales, con diferentes sistemas de coordenadas y con determinadas gamas de colores, que varían respecto al tamaño de sus espacios. A continuación se presenta información de los espacios de color RGB y HSV.

6.3.1. Espacio de Color RGB

El espacio de color RGB, también conocido como espacio de color cubico dado que su representación matemática tridimensional es un cubo, cuyos componentes espectrales primarios, R (rojo), G (verde) y B (azul) conforman un espacio cartesiano ortogonal. Las imágenes en espacio de color RGB se componen de tres bandas con información independiente, una para cada color primario.

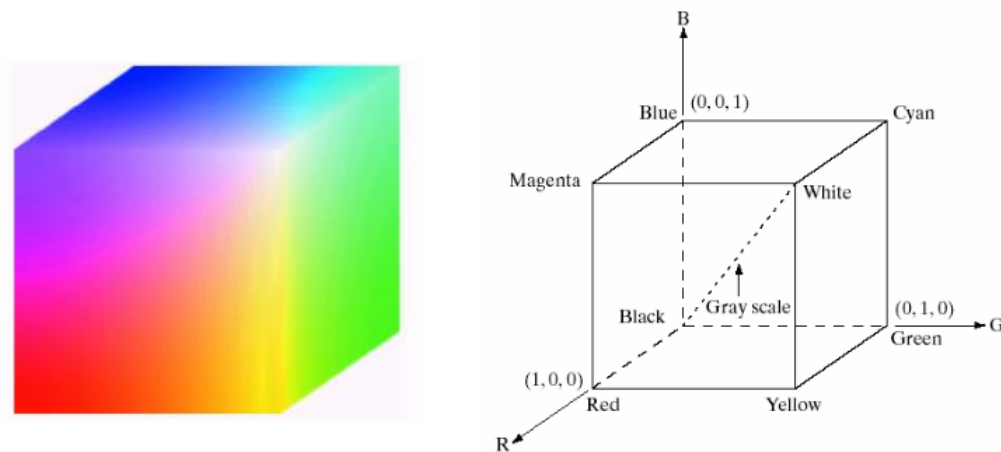


Figura 6.5: Cubo de colores RGB y esquemático.

El formato RGB se usa principalmente en cámaras para adquisición de imágenes digitales y monitores de visualización, por tanto este se considera un modelo de gran importancia en Visión Artificial.

Cabe resaltar que este modelo no presenta mayor robustez ante los cambios de iluminación (Zhang et al., 2014). Por tanto una normalización de los valores RGB, permite suprimir las distorsiones que generan la incidencia de luces y sombras en una imagen. La ecuación 6.37 define como se normalizan las componentes de color RGB.

$$r = \frac{R}{R+G+B}, g = \frac{G}{R+G+B}, b = \frac{B}{R+G+B} \quad (6.37)$$

6.3.2. Espacio de Color HSV

Este espacio de color de características cónicas, representa los componentes perceptivos, H (matiz), S (saturación) y V (Valor o Brillo), las cuales no puede describir el espacio de color RGB, como se presenta en la figura 6.6. La transformación dada entre los espacios RGB y HSV es de carácter no lineal.

Este espacio de color se encuentra en los siguientes rangos de color: de 0 hasta 1 en S y V y H medida en valores de 0° a 360° (Zhang et al., 2014).

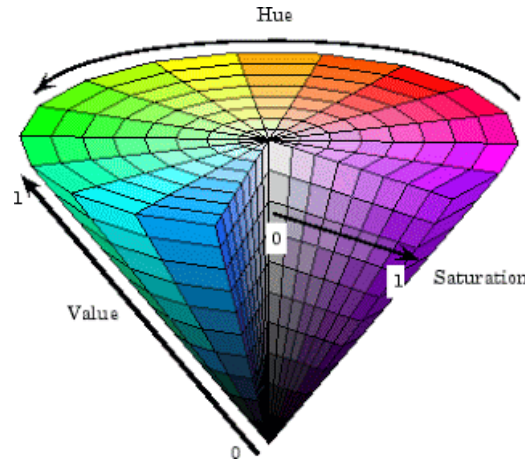


Figura 6.6: Esquema de espacio de color HSV.

6.4. Método de interpolación media móvil

Este método de interpolación estima los valores de elevación a través de una función inversa de la distancia, suponiendo que un punto tiene valores similares a los puntos muestrales más cercanos.

A partir de un punto se selecciona una serie muestral, a través de la media aritmética de sus elevaciones y el ponderado de sus valores por un factor dependiente de la distancia de cada punto muestral se halla la elevación del punto no muestral considerado, como se muestra en la ecuación 6.38.

$$Z_i = \frac{\sum_j (Z_j \cdot W_{ij})}{\sum_j W_{ij}} \quad (6.38)$$

donde:

i punto no muestral.

j punto muestral.

Z_i es la altura estimada en el punto no muestral i .

Z_j es la altitud real en el punto muestral j .

W_{ij} factor de ponderación dependiente de la distancia entre i y j .

7 Marco Referencial

La realidad aumentada permite representar en el mundo real objetos o superficies que se encuentran desarrollados en el mundo virtual (González et al., 2011) a partir de un conjunto de tecnologías (Roncagliolo et al., 2007). Es considerada una de las interfaces que incursionarán en el futuro (Chi et al., 2013), dada su aplicabilidad en diversas etapas de desarrollo de un proyecto, como son las etapas de diseño, construcción, mantenimiento y renovación, (Klinker et al., 2001), lo que permite disminuir los costes que conllevan la representación física de maquetas y modelos estructurales (Peredo and Redondo, 2011), al igual que su inmediata actualización en caso de presentar cambios y una visión tridimensional de los objetos (Ruiz et al., 2004). La aplicabilidad de realidad aumentada en la educación también es considerado de gran importancia, porque mejora la representación de información y a su vez facilita su entendimiento (Lin et al., 2016).

Existen diversas técnicas que permiten reconstruir la realidad, pero estas implican altos gastos o software de alta capacidad, contrario a la realidad aumentada, puesto que esta hace uso de dispositivos móviles u otros que se encuentran a mayor alcance y que de igual manera brindan buenos resultados, (Yang et al., 2013).

La realidad aumentada trabaja asociando elementos virtuales a características físicas del mundo real registrada en imágenes, dándoles interacción y la capacidad de estar juntas dentro de un espacio determinado (Fonseca et al., 2014). Ella se diferencia de la realidad virtual en que ésta no se encuentra en un entorno simulado totalmente por ordenador (Khan et al., 2011). Esta se puede implementar mediante la edición de archivos en formato CAD (Al-Qawasmí, 2005; Doabelis and Brinkis, 2006; Pozzi, 2012), puesto que estos permiten que los procesos de manipulación de los objetos virtuales se realicen de una manera más detallada y se encuentren debidamente geo-referenciados (Gatt, 2012), generando estados de interacción entre los mundos bidimensionales y tridimensionales ((Bouchlaghem et al., 2005), lo que permite generar una visualización conjunta de los elementos virtuales en un plano como lo es una imagen convencional (Malbos et al., 2014). De igual manera la precisión juega un papel importante en la implementación de la realidad aumentada (Holloway, 1997) puesto que garantiza la correcta integración de los diferentes sistemas coordenados (Wang, 2006).

Por otra parte este conjunto de tecnologías presentan dos problemas principales, como son la integración sistemas de coordenadas y la oclusión que se puede presentar ante el usuario (Coelho and Bähr, 2005). Para la corrección de la oclusión se trabaja con imágenes obtenidas desde diferentes puntos de vista logrando que objetos dentro de la imagen se puedan percibir según la posición visual del usuario (Seo and Lee, 2013). La perspectiva se corrige teniendo en cuenta los diversos ángulos de orientación que puede tener un objeto (González et al., 2011).

Las técnicas que permiten forjar una asociación entre los sistemas de coordenadas son

de gran importancia para poder trabajar con realidad aumentada (Simon et al., 2000), como son la captura de información a través de sistemas de posicionamiento, marcas y rasgos de perspectiva (Callejas et al., 2011), lo que implica muchas veces controlar los ambientes internos para el correcto funcionamiento de estos (Huang et al., 2016).

Se utilizan dos procedimientos de transformación para la visualización de los objetos virtuales en las imágenes del mundo real, la transformación del sistema coordenado del dispositivo de captura de imágenes al sistema coordenado de la imagen y la transformación del sistema coordenado del mundo al sistema coordenado del dispositivo de captura. También la obtención de parámetros intrínsecos y extrínsecos permiten realizar una calibración precisa del objeto capturado de señales para poder asociar los diferentes entornos, (Taketomi et al., 2013).

La inserción de superficies virtuales geo-referenciados en un entorno tangible es una de las virtudes de la realidad aumentada (Uceda (2014)), permitiendo una visión de las características del terreno mediante la representación de las imágenes (Fukuda et al., 2014), y además facilita la observación del comportamiento a futuro con los objetos virtuales tridimensionales cohesionados en un entorno (Wang et al., 2013). El correcto procesamiento de la información obtenida del entorno influye en el posicionamiento de los objetos virtuales en el entorno real (Polvi et al., 2016).

El componente interactivo de los Entornos Virtuales Geográficos permite mejorar la capacidad de reconocimiento del usuario con el fin de permitir obtener una experiencia emocional y racional, donde la interpretación de la superficie sea de mayor entendimiento y aporte al desarrollo de estudios de fenómenos existentes o futuros (Liu and Hao, 2010), lo que no se obtiene en sí con un plano topográfico que representa una superficie pero su interpretación puede ser compleja por sus diferentes sistemas de proyección y representación, al igual que los conocimientos que debe tener quien pretenda evaluarlo (Uceda, 2014). Por tanto se considera la realidad aumentada como uno de los componentes interactivos de los Entornos Virtuales Geográficos, diferenciando que esta componga en su totalidad uno de estos entornos, dado que facilita la visualización y la percepción de las superficies, mas no integra bases de datos existentes y simulación de componentes (Lin et al., 2013).

8 Hardware del Sistema

La estructura general para la implementación de realidad aumentada contempla tres fases; la captura del entorno real, la correspondencia entre los diferentes sistemas coordenados que intervienen, y la visualización para el usuario a través de un dispositivo. La figura 8.1 presenta la composición y relación entre los componentes.



Figura 8.1: Relación entre los componentes del hardware.

La plataforma que se desarrolló en este proyecto se presenta a continuación en la figura 8.2.

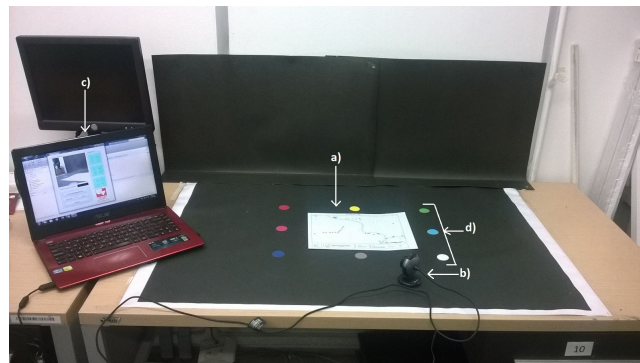


Figura 8.2: Configuración física de la plataforma: a) Plano Topográfico, b) Cámara web, c) Computador y d) Plantilla de marcadores.

8.1. Cámara Web

La cámara web se utilizó como dispositivo de entrada para la adquisición de imágenes del entorno real junto a los marcadores y el plano topográfico. La posición de la cámara determina la perspectiva para la posterior visualización de la cartografía.

La cámara web que se empleó fue la Microsoft LifeCam VX-3000. Las características de la cámara son:

- Resolución: 1280 x 960
- Velocidad: 30 fps
- Balance de blanco: Automático
- Conexión: USB

El sistema puede trabajar con otras cámaras siempre y cuando se haya realizado su calibración, lo que permite tener sus parámetros intrínsecos y estimar su posición respecto a un sistema de referencia.

8.2. Plano Topográfico

El plano topográfico tiene una interacción principalmente de carácter cualitativo, puesto que permite al usuario llevar a cabo el proceso de comparación entre lo que éste representa, que son objetos planos y figuras, y la superficie tridimensional de lo que esto es en el mundo real. De igual manera este plano al contener datos de lo que representa, como son su nomenclatura, sus convenciones y su sistema de coordenadas, aporta cierta información que se usa en la aplicación para que ésta pueda definir qué superficie y plano debe cohesionar.

En este prototipo se usaron 12 planos topográficos a escala 1:525, del municipio de Versailles, ubicado en el departamento del Valle del Cauca. El sistema puede emplear otros planos topográficos si se cuenta con su respectivo modelo virtual que se genera a partir de la nube de puntos y la ortofoto correspondiente a la zona. Las nubes de puntos se pueden obtener de levantamientos con sensor LiDAR, estación total, procesos fotogramétricos, entre otros. La fuente de las ortofotos son: imágenes satelitales e imágenes aéreas. El procedimiento de generación del modelo virtual se describe en la sección 9.1.

8.3. Plantilla de Marcadores

La plantilla de marcadores que se implementó se muestra en la Figura 8.3. En esta plantilla se conocen las coordenadas de los centroides de cada marcador. Estas coordenadas se usan para estimar la posición y orientación de la cámara. De acuerdo con la literatura consultada Nájera Gutierrez (2009) y mencionada en la sección 6.1.4.1 se sugiere usar como mínimo seis puntos con correspondencia bidimensional y tridimensional para poder estimar los parámetros extrínsecos de la cámara. Por lo anterior, y en busca

de no elevar el costo computacional en el cálculo de los parámetros extrínsecos se usaron ocho marcadores de colores.

El color de cada punto fue usado como característica para su identificación. Los marcadores que se usaron tienen un diámetro de 3 cm y su ubicación se estableció para permitir que el plano topográfico se ubicara en el centro de la plantilla sin obstruir la identificación de los mismos. El sistema puede reconfigurarse para trabajar con otro tamaño y distribución espacial de los marcadores.

La plantilla tiene un fondo negro para facilitar la identificación de los marcadores. Es pertinente decir que la herramienta desarrollada solo funciona con este tipo de fondo, pues el proceso de binarización de la imagen se realiza teniendo en cuenta esta condición.

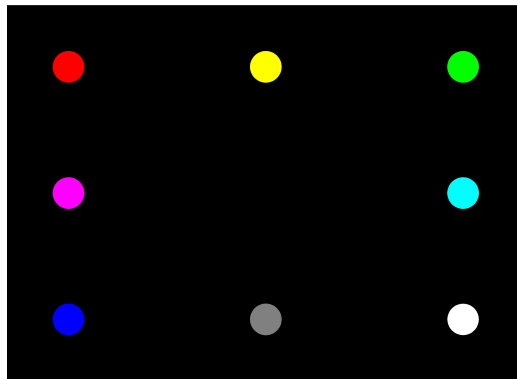


Figura 8.3: Plantilla de marcadores.

8.4. Computador

El computador cumple tres funciones en el prototipo desarrollado: el procesamiento de las imágenes para determinar la perspectiva de visualización, el almacenamiento de datos, que incluyen las versiones digitales de la cartografía, las coordenadas de cada marcador, las imágenes capturadas de la plantilla de marcadores; y la visualización para el usuario a través de su monitor.

Las características del computador utilizado se presentan en el Cuadro 8.1. La herramienta desarrollada se puede utilizar en cualquier computador que cumpla estos requerimientos o con especificaciones superiores.

Cuadro 8.1: Características del computador utilizado.

Característica	Descripción
Procesador	Intel Core i5-3337U 1.8 Ghz
Memoria Ram	6 GB
Tarjeta graficadora	2 GB
Pantalla	1366 x 768

8.5. Conclusiones

- El sistema de marcadores que se utilizó tiene una composición basada en la identificación de colores, permitiendo la asignación de coordenadas sobre estos puntos, además de no elevar el costo computacional en la etapa de procesamiento.
- La plataforma se desarrolló en un ambiente de iluminación controlada tipo oficina con variaciones naturales de iluminación a lo largo del día, sin embargo las características de los marcadores permiten su identificación.

9 Software del Sistema

El desarrollo del sistema interactivo de los entornos geográficos virtuales a través de realidad aumentada contempla un conjunto de procesamientos que permiten la interacción entre la cámara, la plantilla de marcadores y el computador. Dichos procesamientos denominados software del sistema se presentan en la Figura 9.1. En este capítulo se describe cada uno de estos procesos para obtener la implementación de realidad aumentada como componente interactivo de los entornos geográficos virtuales.

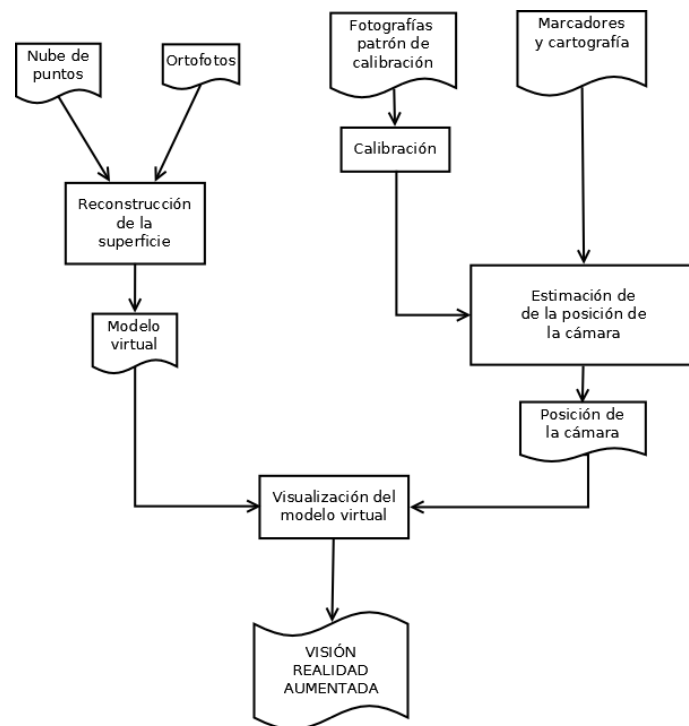


Figura 9.1: Diagrama de procesamientos del sistema.

9.1. Reconstrucción de la Superficie

El proceso de reconstrucción de la superficie tiene como objeto definir el entorno virtual que posteriormente se acopla con el entorno real para generar la visión de realidad aumentada. Este proceso tiene como insumos: una ortofoto, considerada como imagen de campo, y una nube de puntos, que representa la superficie a través de un conjunto de puntos con sus coordenadas norte, este y elevación.

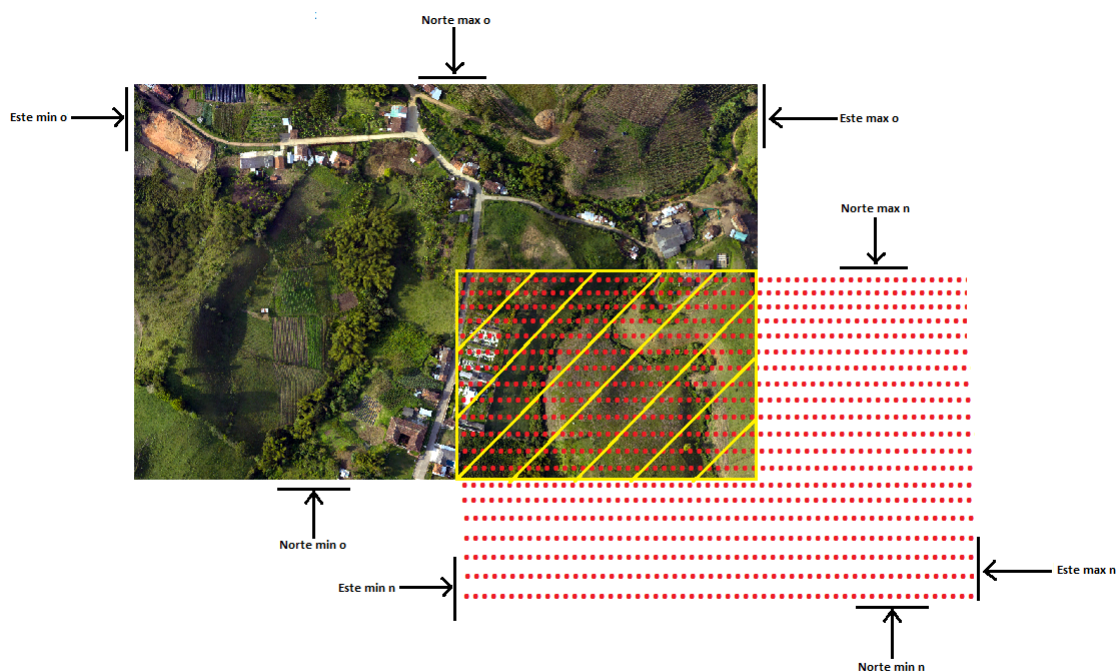


Figura 9.2: Área en común de la ortofoto y la nube de puntos.

Dado que es necesario realizar la reconstrucción de superficies con diferentes características, se emplea una nube de puntos y una ortofoto para cada una de estas. Las nubes de puntos correspondientes a todas las superficies contienen dos tipos de información: el primer tipo se encuentra clasificado con información del suelo y puntos bajos, es decir, la zona correspondiente al terreno, la cual se usa cuando la región es en gran parte rural; y el otro tipo contempla todos los puntos sin distinción, es decir, no se encuentra clasificada puesto que tiene en cuenta: la vegetación media y alta, edificaciones, suelos y vías; usada para generar la superficie en zonas con mayor presencia urbana.

Dada la importancia de definir un área en común para poder realizar la reconstrucción de la superficie se reconocen las coordenadas máximas y mínimas de los insumos y se establece la región en común entre estos con el fin de tener información de un mismo espacio, como se muestra en la figura 9.2.

Se realiza una interpolación de media móvil sobre la nube de puntos, como se presenta en la sección 6.4, para obtener un modelo digital de elevaciones de baja resolución que puede fusionarse con la ortofoto y obtener un modelo con colores asignados que pueda visualizarse sin elevar el costo computacional.

La figura 9.3 muestra una nube de puntos a la cual se calculó su superficie, y la superficie interpolada con diferentes tonalidades que permiten percibir su comportamiento altimétrico. Con el proceso de interpolación se consiguió homogeneizar las elevaciones de las nubes de puntos usadas, dado que la superficie no debe tener cambios marcados

9.2. Calibración

El proceso de calibración permite estimar el modelo de la cámara a través de los parámetros intrínsecos, con los cuales se define su orientación y posición en el sistema de coordenadas de la imagen. De igual manera, permite corregir geoméricamente las imágenes que ésta capture.

Este proceso se llevó a cabo con la aplicación de calibración de cámara de Matlab que usa los métodos descritos en los trabajos de Heikkila and Silven (1997) y Zhang (2009), quienes desarrollaron sus modelos con base en el modelo de cámara de Pinhole presentado en la sección 6.1, e incorporan parámetros de distorsión no lineales presentados en la sección 6.1.4.2.

La aplicación de calibración de la cámara proyecta las coordenadas del mundo real de los puntos identificados con las coordenadas de éstos en la imagen, (Figura 9.5). Las coordenadas reproyectadas se comparan con las correspondientes en la imagen con el fin de establecer los errores de reproyección a través de distancias, considerando los errores menores a un pixel, como aceptables. Estos errores se visualizan en gráficos de barras y dispersión.

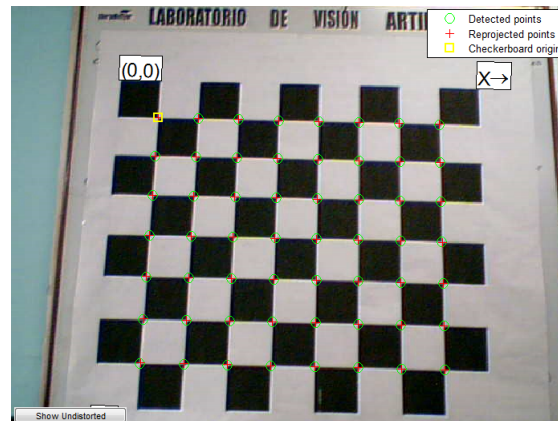


Figura 9.5: Proyección de coordenadas mundo real - imagen.

Los parámetros extrínsecos obtenidos del proceso de calibración se visualizan en un gráfico tridimensional, en el cual se muestran las diferentes vistas desde las cuales el patrón de calibración fue capturado, al igual que la posición que tuvo la cámara para cada una de las capturas.

9.3. Estimación de la posición de la cámara

El procedimiento de estimación de la posición de la cámara tiene como fin establecer cuál es el ángulo de elevación y el azimuth desde el cual el usuario está visualizando el plano topográfico, para así mismo poder proyectar la superficie virtual con base en estos parámetros. Los procesamientos que se llevan a cabo para estimar la posición de la

cámara se describen en este capítulo y se muestran en la figura 9.6

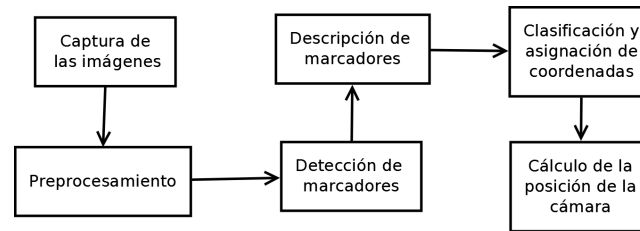


Figura 9.6: Diagrama de procesos de la estimación de la posición de la cámara.

9.3.1. Captura de las Imágenes

La captura de las imágenes se realiza mediante la web cam de Microsoft lifecam VX3000. Para el caso de estudio se utiliza el formato RGB24_640x480, que permite obtener imágenes en formato RGB con resolución de 640 x 480. Estas imágenes cuentan con 3 bandas: rojo, verde y azul.

Se establecieron tres formas de realizar la captura de imágenes: estática, dinámica y en línea. La captura estática consiste en capturar cada una de las perspectivas desde las cuales se desea visualizar la superficie virtual y posteriormente realizar la implementación de realidad aumentada. La captura dinámica se realiza a través de un vídeo el cual se divide en diferentes frames, los cuales son procesados, y finalmente se genera un vídeo con la superficie virtual insertada desde las diferentes perspectivas desde las cuales se obtuvo el vídeo. Finalmente la captura en línea se realiza cada 5 segundos tomando la perspectiva que se tenga en el momento y así mismo genera la ubicación de la superficie virtual.

9.3.2. Preprocesamiento

La corrección de brillo se hace en el espacio de color HSV, pues éste permite desacoplar las componentes de color (Matiz y Saturación) de la componente de Brillo de las imágenes. Así es posible realizar una corrección directamente en la componente V la cual contiene los valores de brillo de la imagen.

Para realizar la corrección de la componente V se determina el promedio total de los valores que contiene, a través de la ecuación 9.1. Los valores menores que el valor promedio obtenido se convierten en cero en la componente V. Este procedimiento permite eliminar el exceso de brillo de la imagen y que el fondo sea homogéneo, con lo que se evita que el brillo altere el color de los marcadores y por consiguientes estos no sean diferenciados.

$$Brillo = \mu = \frac{1}{M * N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) = \sum_{i=0}^{I-1} i * p(i) \quad (9.1)$$

i es el nivel de gris en la imagen

I es el número de grises que se ha empleado en el proceso de cuantificación de la imagen

$F(x, y)$ retorna el nivel de gris del píxel situado en las coordenadas (x, y)

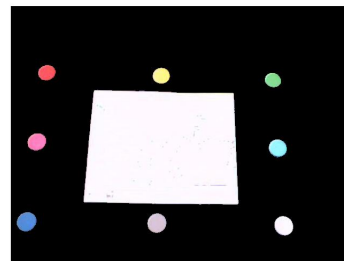
$p(i)$, probabilidad de i en la imagen

M, N , número de filas y columnas en la imagen

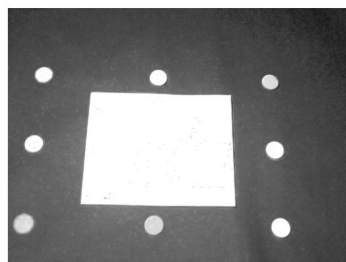
Con la componente V corregida se vuelve al espacio de color RGB para continuar con la binarización de la imagen resultante del ajuste. La figura 9.7 muestra la corrección realizada sobre una imagen, donde la figura 9.7a muestra la imagen de marcadores capturada por la cámara sin realizar ningún ajuste a sus componentes, en la figura 9.7b se muestra la imagen corregida después de editar el componente V en el espacio color HSV, en la figura 9.7c se muestra la componente V de la imagen de marcadores inicial y en la figura 9.7d se muestra la corrección de brillo aplicada al componente V.



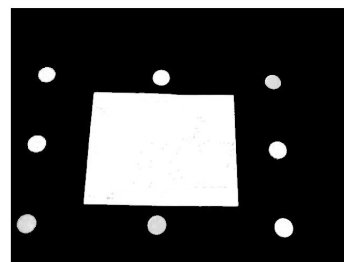
(a) RGB sin ajuste



(b) RGB con ajuste



(c) Componente V sin ajuste



(d) Componente V con ajuste

Figura 9.7: Corrección de Brillo.

9.3.3. Detección de Marcadores

En esta etapa se busca separar el fondo de los marcadores y la cartografía. Se asigna valores lógicos 0 y 1 a cada píxel en la imagen de manera que a los marcadores de colores que tiene la plantilla y la cartografía análoga se les asigne el valor 1 y al resto de la imagen, el fondo, se le asigna un valor lógico de 0. Para ello se umbraliza la imagen banda por banda y se unen los resultados de los valores obtenidos mediante el operador lógico OR, estableciendo con esto los objetos de la imagen correspondientes a los marcadores y la cartografía, como se muestra en la figura 9.8.

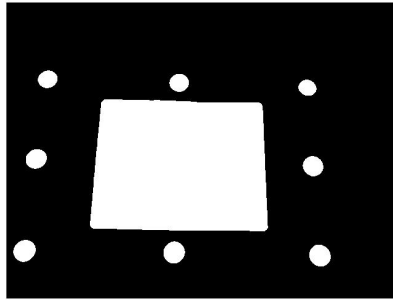


Figura 9.8: Binarización de la imagen.

Utilizando los objetos de la imagen identificados en la binarización se procede a generar un análisis para cada una de dichas regiones. Este procedimiento se basa en obtener los valores en píxeles de los centros de los objetos y el área de los mismos. Antes de utilizar los datos se deben filtrar los valores para obtener la información que coincida con áreas de objetos menores a 2000, pues la cartografía análoga con la que se cuenta no hace parte del cálculo de coordenadas de los marcadores de colores; por tanto se restringe la búsqueda y solo se trabaja con los valores que pasen el filtro de los datos.

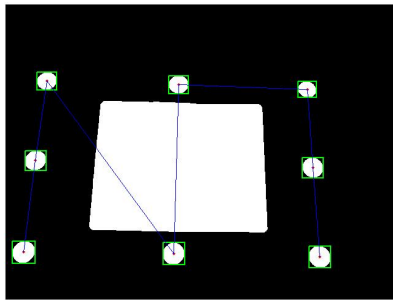


Figura 9.9: Determinación de centroides de la imagen.

El cálculo de centroides en la imagen se realiza para obtener las coordenadas reales de los marcadores de la plantilla, las cuales se encuentran en el sistema de coordenadas de la imagen.

9.3.4. Descripción de Marcadores

Para el cálculo de valores de los marcadores se utiliza la imagen en el espacio de color HSV, estudiando cada banda por separado. El proceso se basa en evaluar los objetos en cada una de las componentes de este espacio de color, para poder conocer la información de los marcadores en cada una de estas, es decir, conocer su valores en los componentes de Matiz, Saturación y Brillo.

Para minimizar los cálculos se utiliza un promedio de cada uno de los marcadores, lo que arroja un único valor por cada uno de éstos. Esta información se guarda en una

matriz para el reconocimiento de colores en el clasificador tipo red neuronal.

El vector de características que se genera para cada marcador detectado se conforma por las componentes HSV promedio de los píxeles que hacen parte de los segmentos asociados a cada marcador.

9.3.5. Clasificación y Asignación de Coordenadas

Inicialmente para el desarrollo del clasificador se analizó la plantilla y la cantidad de marcadores que se necesita contabilizar. Partiendo de esto, se establecieron ocho clases identificadas con una numeración del 1 hasta el 8; dichas clases tienen una serie de patrones establecidos en características propias, dadas por el espacio color HSV, es decir, que cada clase tenía una identificación en tres componentes, H, S y V.

En el desarrollo del clasificador se utilizó una red neuronal tipo feed forward, con tres nodos en su capa de entrada, 10 neuronas en la capa oculta con función de activación tangente sigmoideal, y 8 neuronas en la capa de salida con función de activación lineal (figura 9.10). Las tres características de entrada corresponden a los componentes HSV de cada marcador y las salidas corresponden a los 8 colores de la plantilla.

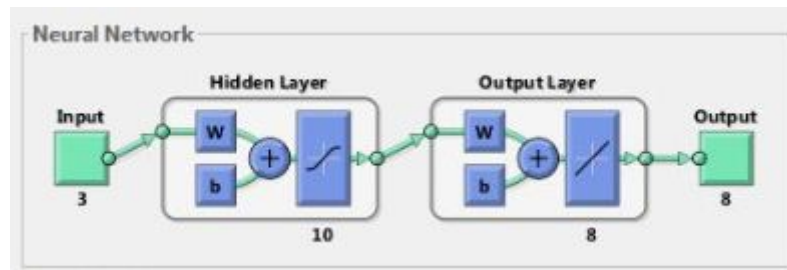


Figura 9.10: Especificaciones de la red.

El entrenamiento del clasificador se realiza con imágenes capturadas en diferentes condiciones de iluminación y diferentes tipos de ángulos, con el fin de obtener una muestra amplia de las variaciones de los colores en la plantilla, permitiendo al algoritmo identificar en diversas condiciones el valor aproximado de los marcadores.

Para la identificación de las coordenadas del mundo real se utiliza la matriz donde se encuentran los valores de HSV de los 8 marcadores de colores generada en la sección 9.3.4, la cual se clasifica en la red neuronal y permite obtener identificadores para cada uno. Estos identificadores se asocian a un listado de coordenadas establecidas con medidas del mundo real de la plantilla de colores, y de esta manera se referencian en el sistema de coordenadas real.

Se construye una matriz de coordenadas del mundo real y de la imagen, como se muestra en la ecuación 9.2, correspondiente a la información de los cinco datos obtenidos a partir de los marcadores de color, estos datos corresponden a $[xyz]$ para el mundo y $[uv]$ para la imagen. Esta matriz se utiliza para el cálculo de los parámetros extrínsecos de la cámara (vector de traslación y ángulos de Euler). Con estos parámetros se calculan

los valores de los ángulos de azimut y elevación, los cuales determinan la perspectiva de la cámara respecto a la cartografía visualizada.

A las coordenadas de la imagen no se les realiza la corrección geométrica en el pixel puesto que estas son extraídas de los marcadores.

$$Coordenadas = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & u_0 & v_0 \\ x_i & y_i & z_i & u_i & v_i \\ x_n & y_n & z_n & u_n & v_n \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

9.3.6. Cálculo de la Posición de la Cámara.

El cálculo de la posición de la cámara requiere tres entradas: la primera es la cámara, la cual debe tener información asociada de sus especificaciones. Entre éstas se solicitan los valores que se obtienen de la calibración y especificaciones del fabricante. Como segunda entrada se pide la matriz de datos creada en la sección 9.3.5. La entrada final es la matriz de parámetros intrínsecos. Estas entradas permiten realizar un cálculo de la posición de la cámara utilizando el método de Heikkila and Silven (1997), sección 6.1.4.2.

La corrección geométrica se realiza en este apartado, pues permite que la estimación de la posición de la cámara incluya las diferentes distorsiones calculadas en la calibración de la cámara.

Las coordenadas de la posición de la cámara finalmente se calculan a través de la pseudoinversa de la matriz R y multiplicandola por el vector T (ecuación 9.3).

$$PosiciónCámara = pinvR * T \quad (9.3)$$

El vector PosiciónCamara tiene un tamaño de 1x3, el cual representa la posición de la cámara respecto al origen del mundo real, y permite generar los ángulos de azimut y elevación.

El azimut θ y la elevación δ , se calculan utilizando las coordenadas de la posición de la cámara de X y Z , y X , Y y Z de la posición de la cámara respectivamente, lo que permite definir los ángulos de visualización de la superficie respecto a la posición de la cámara.

θ_i es el valor correspondiente al cálculo del azimut a partir de las coordenadas de la posición real de la cámara.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{z}{x} \right) \quad (9.4)$$

δ_i es el valor correspondiente a la elevación de la cámara.

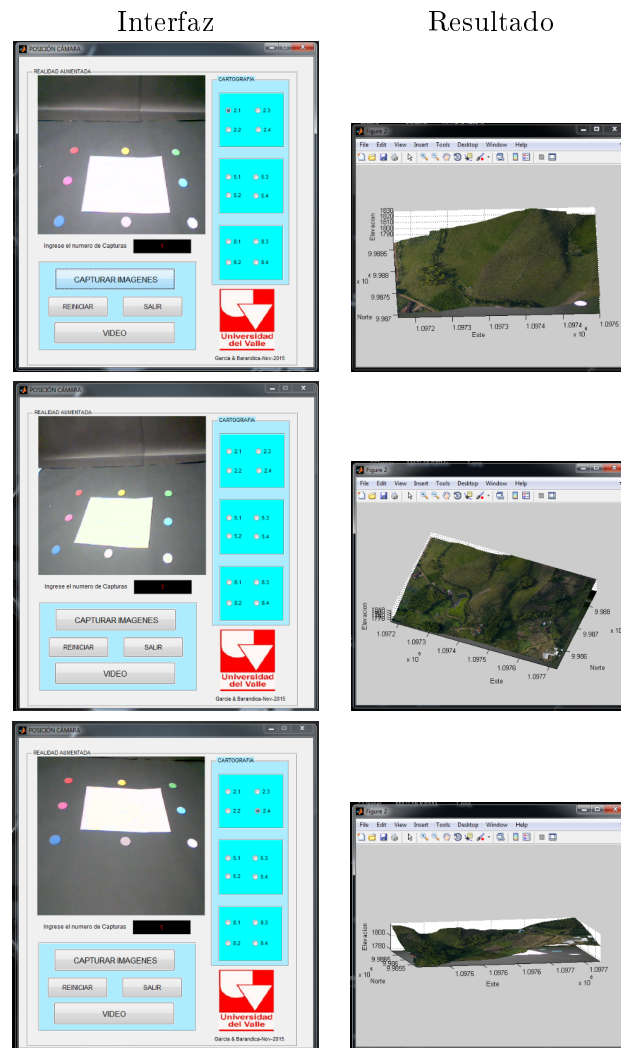
$$\delta_i = \tan^{-1} \sqrt{\frac{x^2 + z^2}{y}} \quad (9.5)$$

9.4. Visualización del Modelo Virtual

La visualización del modelo virtual se realiza a través de la interfaz que permite interpretar la cartografía a partir de la reconstrucción de la superficie desde la posición estimada de la cámara.

Cabe resaltar la importancia de generar una reconstrucción de la superficie de baja resolución que permita interactuar con el resultado obtenido y que no requiera de un alto costo computacional.

La estimación correcta de la posición de la cámara conlleva a que el usuario interprete correctamente la superficie desde los diferentes ángulos donde capture la imagen, para obtener la visualización del componente interactivo del entorno geográfico virtual, como se muestra en la figura 9.1.



Cuadro 9.1: Resultados de modelos virtuales generados.

9.5. Conclusiones

- La nube de puntos que se utiliza permite generar una superficie para el terreno, que unida a la ortofoto correspondiente permite que el usuario identifique e interactúe con la información relacionada con la topografía que contiene una plancha topográfica. El procedimiento desarrollado puede utilizarse en cualquier zona de la que se cuente con su ortofoto y su nube de puntos que permitan generar el modelo virtual. Sin embargo la generación del modelo virtual puede requerir mayor tiempo de procesamiento cuando la densidad de los puntos es mayor. Se puede emplear cualquier nube de puntos pero cabe resaltar que de ésta depende la calidad de la superficie obtenida por el proceso de interpolación.
- El método de calibración de la cámara de Heikkila and Silven (1997) implementado, permite estimar los parámetros intrínsecos de la cámara con un error asociado menor a un pixel, lo cual aporta visualizaciones apropiadas para el usuario.
- El software del sistema permite estimar las posiciones de los marcadores en diferentes sistemas de coordenadas, a través procesamientos realizados a las imágenes. En estos procesos se presentan errores en la estimación de dichas posiciones y que afectan el resultado final de la herramienta.

10 Pruebas y Resultados

En este capítulo se presentan y describen las pruebas realizadas con el fin de evaluar el desempeño del sistema de implementación de realidad aumentada, estas pruebas corresponden a los siguientes procedimientos: calibración de la cámara, análisis de la clasificación, estimación de la posición de la cámara y finalmente la visualización del modelo virtual.

10.1. Calibración de la Cámara

Esta prueba se realiza con el fin de obtener y evaluar el modelo de la cámara para determinar sus parámetros intrínsecos, los cuales permiten realizar la corrección geométrica de las imágenes y establecer la relación entre el sistema de coordenadas de la cámara y la imagen.

10.1.1. Procedimiento

Se realizó la captura de 17 imágenes del patrón de calibración, que se analizaron para obtener los parámetros por medio de la aplicación de Matlab, el patrón de calibración se presenta en la figura 10.1. Este patrón consta de 72 cuadrados, distribuidos en 9 filas y 8 columnas, cada uno de 10x10 cm.



Figura 10.1: Patrón de calibración.

Las imágenes del patrón de calibración fueron capturadas en una serie ángulos aleatorios y desde distancias entre 1 y 1.5 metros para poder obtener un modelo aplicable en el espacio de operación de la cámara en el prototipo desarrollado. La Figura 10.2 muestra las posiciones del patrón de calibración respecto al centro óptico de la cámara, es decir, cómo se comporta cada una de las imágenes respecto a un punto fijo de la cámara. También se muestra el error medio en pixeles que se obtiene en la calibración para las 17 imágenes procesadas.

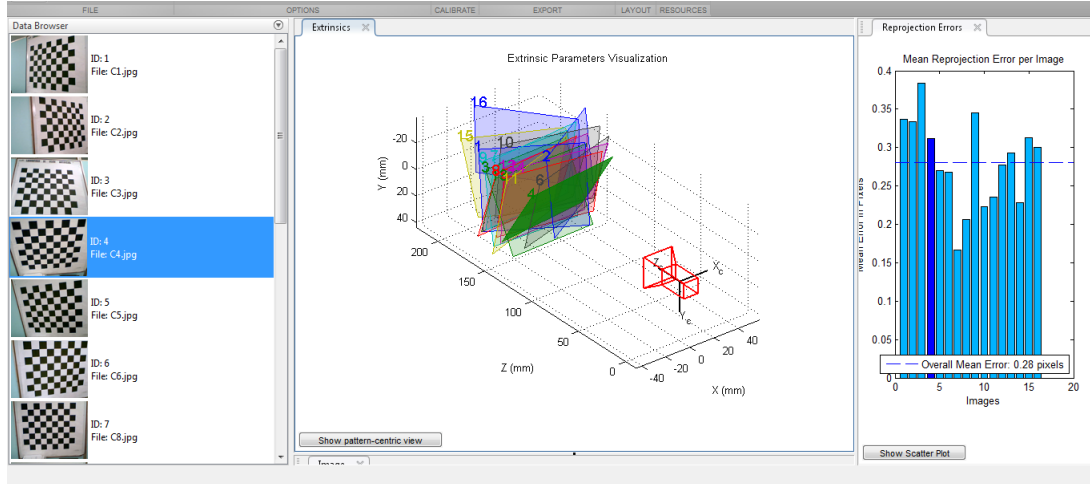


Figura 10.2: Posiciones de captura del patrón de calibración.

Los parámetros que se obtienen del modelo son los siguientes: coeficientes de distorsión radial y tangencial, longitud focal, valores del punto principal, error por pixel, matrices de rotación y vectores de traslación. A través del error medio del pixel se define la confiabilidad de los parámetros obtenidos, con los que posteriormente se calculan los parámetros extrínsecos de la cámara, que permiten estimar su posición respecto al mundo real.

10.1.2. Resultados

A partir de las imágenes capturadas se obtuvo un modelo para la cámara usando el método de Heikkila and Silven (1997), cuyos valores se presentan continuación.

Matriz de parámetros intrínsecos:

$$M = \begin{bmatrix} 765,158 & 0 & 0 \\ 0,222 & 763,175 & 0 \\ 321,540 & 271,374 & 1 \end{bmatrix}$$

Longitud focal

$$Fc = 3,343 \text{ mm}$$

Punto principal

$$cc = (321,537, 271,373) \text{ pixeles}$$

1er coeficiente de distorsión radial

$$K1 = 7,08 \times 10^{-3}$$

2do coeficiente de distorsión radial

$$K2 = 3,87505 \times 10^{-4}$$

1er coeficiente de distorsión tangencial

$$P1 = 5,603 \times 10^{-3}$$

2do coeficiente de distorsión tangencial

$$P2 = -2,959 \times 10^{-3}$$

La distribución de error medio por pixel estimado que se obtiene para el modelo se muestra en la Figura 10.3.

$$\text{Pixel error} = [0,28 \quad 0,22]$$

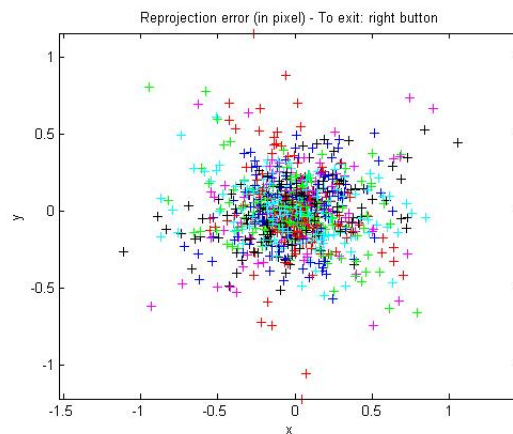


Figura 10.3: Error de reproyección.

El error obtenido en el proceso de calibración es menor al valor de aceptación estandarizado de 1 pixel Heikkila and Silven (1997), en los ejes X y Y . Por esta razón se espera que los parámetros intrínsecos obtenidos puedan ser usados para las correcciones geométricas en etapas posteriores del sistema desarrollado.

Cuadro 10.1: Características de los pixeles del dataset.

Color	Etiqueta	Cantidad de pixeles
Azul	1	3166
Magenta	2	2960
Rojo	3	2345
Amarillo	4	2750
Verde	5	2422
Cyan	6	2736
Blanco	7	3267
Gris	8	2529

10.2. Análisis de la Clasificación

Con esta prueba se pretende clasificar correctamente los colores de la plantilla de marcadores en la imagen capturada, con el fin obtener los parámetros extrínsecos que permita relacionar el sistema de coordenadas de la cámara con el sistema de coordenadas del mundo real.

10.2.1. Procedimiento

Se genera un set de datos a partir de 21 imágenes capturadas en diferentes posiciones y condiciones de iluminación. De estas imágenes se extrajeron regiones de interés de las que se tomó la información correspondiente a las componentes H-S-V, asociándolas a una etiqueta relacionada con el color. Se obtuvieron 22.175 datos que corresponden a los pixeles que se encontraron en dichas regiones. En la tabla 10.1, se presentan las características de los pixeles obtenidos para el dataset, las cuales corresponden al color, la etiqueta asignada y la cantidad de datos asociados.

Este procedimiento se hizo con el fin de buscar en la imagen 8 clases correspondiente a los colores en la plantilla, los cuales se caracterizan por tener valores singulares en cada uno de sus componentes H, S y V, independientemente de las condiciones de captura. La red se entrenó 6 veces.

Las características particulares de cada color en el espacio HSV, permitió que las clases fueran discriminadas una a una y poder asignar una clase a cada color. Finalmente se construyó una matriz de confusión que permitió evaluar la cantidad de aciertos que se presentaron para las 22.175 muestras. El clasificador se entrenó con el 70 % de las muestras, es decir, con 15.522 datos y se validó con el 15 % de la muestra total, que corresponde a 3.326 datos, dejando un 15 % restante de la muestra para las pruebas.

10.2.2. Resultados

Los colores primarios del espacio de color RGB, presentan confusiones en el proceso de clasificación dado su proximidad con los colores secundarios amarillo y el magenta,

de igual forma este efecto se presenta en los colores blanco y gris como se presenta en la figura 10.4.

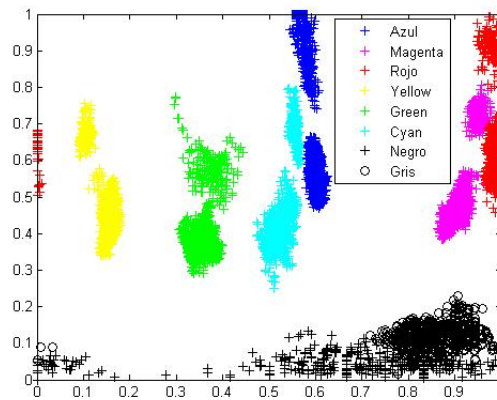


Figura 10.4: Distribución de la clasificación por redes neuronales.

La figura 10.5, muestra la convergencia de las líneas que expresan el comportamiento del entrenamiento, validación y pruebas del clasificador de red neuronal, donde se indica que el mecanismo detuvo el proceso a la época 145 con un valor mínimo de validación de 0.074163 %.

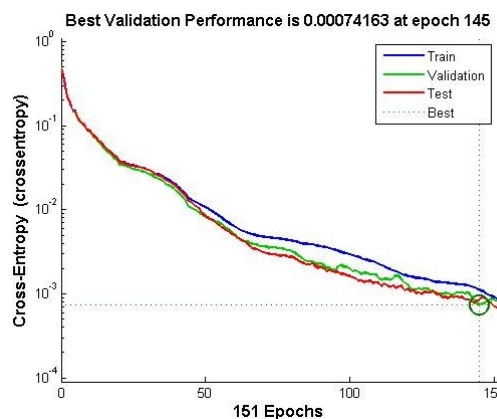


Figura 10.5: Gráfica de desempeño de la red neuronal.

La matriz de entrenamiento de la red se presenta en la figura 10.6, esta presenta un porcentaje de aciertos del 99.9 % y un 0.1 % correspondiente a los datos que no se clasificaron correctamente.

Un 0.5 % de los datos no fueron asignados correctamente al color rojo, un 0.04 % de datos no se asignaron correctamente al color blanco y finalmente en el entrenamiento no se clasificaron bien el 0.2 % de las muestras asignadas al color gris.

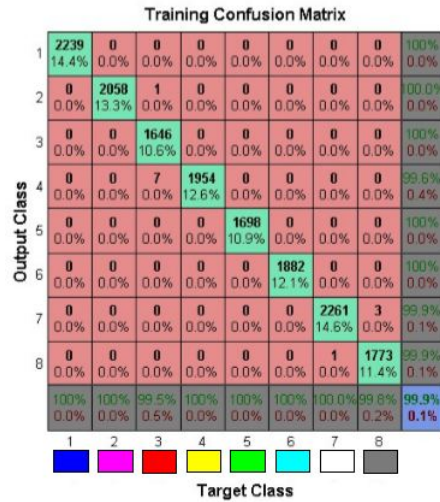


Figura 10.6: Matriz de confusión de los datos de entrenamiento de la red neuronal.

En la matriz de validación de la red neuronal, figura 10.7, se observa un porcentaje de aciertos final del 100 %. Donde un dato difiere de la clasificación, el cual corresponde a clasificación incorrecta del color blanco, un 0.2 % de las muestras.

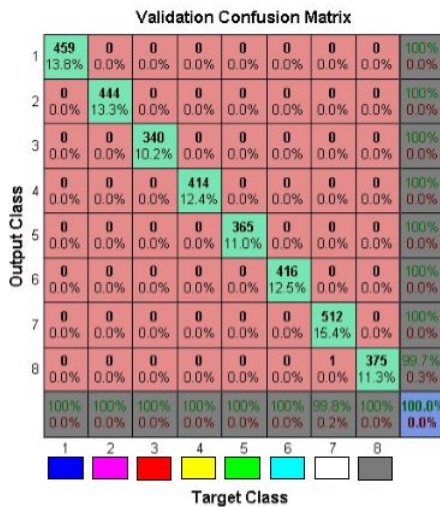


Figura 10.7: Matriz de confusión de los datos de validación de la red neuronal.

La matriz de confusión de los datos de prueba de la red neuronal que se presenta en la figura 10.8, tiene un porcentaje de datos no clasificados de 0.2 % de los datos que corresponden al color magenta el cual se clasificó de manera errónea con el color rojo; pero su porcentaje de clasificación total es del 100 %.

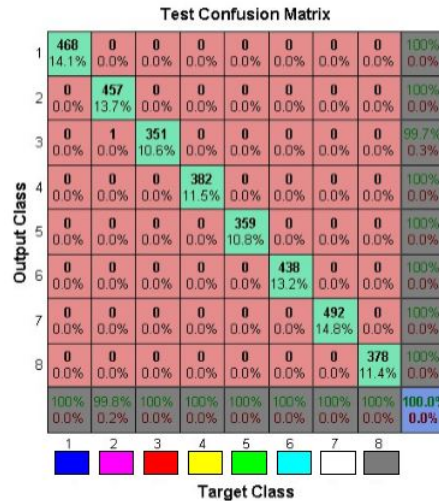


Figura 10.8: Matriz de confusión de los datos de prueba de la red neuronal.

La matriz de confusión total de la red neuronal de la figura 10.9, presenta un porcentaje de aciertos del 99.9 %. El 0.1 % restante corresponde a los marcadores con una clasificación errada del color debido al exceso o falta de iluminación o ángulos de elevación muy bajos en la toma de las imágenes, entre otros factores. Los datos mal clasificados en el color magenta son del 0.0003 %, para el color rojo 0.3 %, el color blanco un 0.1 % y el color gris un 0.1 %.

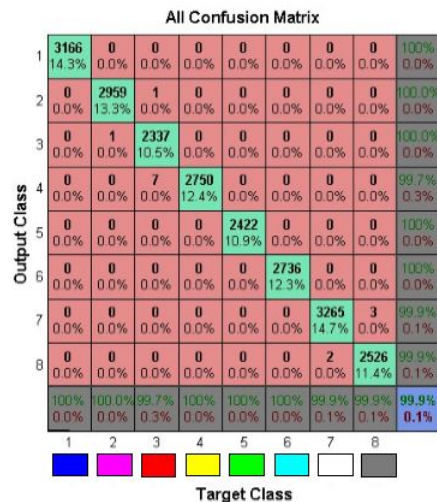


Figura 10.9: Matriz de confusión total de la red neuronal.

El color blanco incide en los demás colores proporcionando un brillo adicional a la iluminación y afecta a los demás marcadores en el momento de captura, lo que puede ocasionar que los pixeles tengan información errónea. Finalmente los últimos datos que

presentan error en el entrenamiento del clasificador son los que asocian el brillo al gris.

10.3. Evaluación Cuantitativa del Sistema

En esta sección se presentan las pruebas de carácter cuantitativo que se realizaron al sistema, estas fueron: la estimación de la posición de la cámara respecto a los errores en los ángulos de azimuth y elevación, y los tiempos de ejecución en los diferentes modos de captura con los que cuenta el sistema. No se tuvo en cuenta la precisión entre la superficie 3D generada y el plano cartográfico, puesto que este último a ser una representación bidimensional de la superficie, y encontrarse en un mismo sistema de referencia y de coordenadas no presenta variaciones posicionales.

10.3.1. Estimación de la posición de la cámara

La estimación de la posición de la cámara se realiza con el fin de encontrar la posición y orientación de la cámara respecto a la plantilla de marcadores, por medio de los ángulos de azimuth y elevación. Esto permitirá generar la visualización del modelo virtual correctamente, teniendo en cuenta la perspectiva desde la cual el usuario desea proyectar dicha información.

10.3.1.1. Procedimiento

La posición y orientación de la cámara en el momento de captura de una imagen se estima a partir de las coordenadas imagen de los marcadores mencionados en la sección 8.3 utilizando el método del modelo inverso propuesto por Heikkila and Silven (1997).

La perspectiva de visualización del modelo se define a partir de un ángulo de azimuth y un ángulo de elevación como se muestra en la Figura 10.10

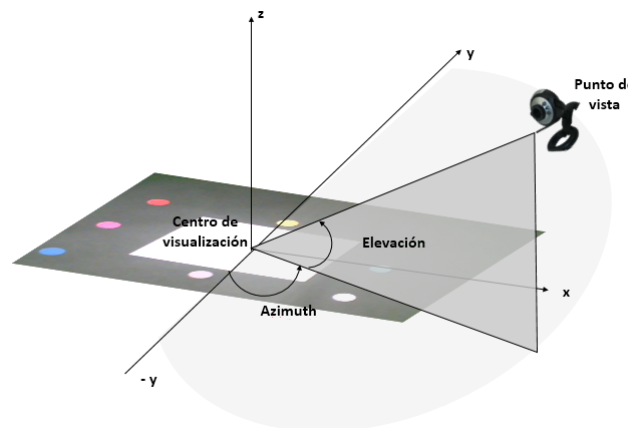


Figura 10.10: Representación de ángulo de azimuth y elevación.

Para las pruebas se capturaron 3 imágenes por cada posición fija de la cámara sobre un trípode, en 4 ángulos de azimuth diferentes, correspondientes a 0° , 90° , 180° y 270° . El proceso de evaluación de los valores de elevación se realizó simultáneo con el descrito anteriormente, en este no se varió la elevación en diferentes posiciones pero se obtuvo una mayor cantidad de muestras (12), que permitieron definir un error promedio de ángulo de la elevación en diferentes ángulos de captura de la plantilla de marcadores.

Los valores reales de azimuth se establecieron mediante cinta métrica y ecuaciones trigonométricas, los cuales permitieron comparar los valores reales y los obtenidos con la aplicación. Para la elevación se realizó el mismo procedimiento matemático, pero estas capturas se realizaron desde un mismo ángulo. Los valores obtenidos permiten evaluar la precisión de la aplicación desarrollada.

10.3.1.2. Resultados

A continuación se muestra una tabla donde se registraron los resultados que se obtuvieron para verificar los errores que tiene asociado el sistema respecto a los ángulos que estima.

Cuadro 10.2: Errores en los ángulos representados.

Pruebas de Azimut y Elevación			
Azimut Real	Error en Azimut Calculado	Elevación Real	Error en Elevación Calculado
0°	(+/-) 3°	33.91°	(+/-) 4°
90°	(+/-) 8°		(+/-) 5°
180°	(+/-) 5°		(+/-) 1°
270°	(+/-) 8°		(+/-) 4°
Error Promedio Azimuth	(+/-) 6°	Error Promedio Elevación	(+/-) 3.5°
Error Máximo Azimuth	8°	Error Máximo de Elevación	5°
Error Mínimo Azimuth	3°	Error Mínimo de Elevación	1°
Desviación S Azimuth	2.449	Desviación S Elevación	1.732
Mediana Azimuth	6.5°	Mediana Elevación	4°

El error promedio calculado entre los ángulos reales y los valores obtenidos implementando la aplicación corresponden a $\pm 6^\circ$ y $\pm 3,5^\circ$ para azimuth y elevación respectivamente.

Los ángulos 0° y 180° que se encuentran sobre el eje Y , es decir la línea que representa el Norte, presentan un error promedio igual, que corresponde a $\pm 8^\circ$; por otra parte los ángulos 90° y 270° sobre el eje X , eje de las Este, presentan un error promedio asociado de $\pm 4,5^\circ$.

10.3.2. Estimación del Tiempo de Ejecución por cada Modo de Captura

Esta evaluación se realiza con el fin de establecer el tiempo en el cual el sistema procesa una imagen en cada uno de los modos de ejecución.

10.3.2.1. Procedimiento

Se ejecutó el sistema para una imagen en sus diferentes modos de ejecución: estático, dinámico y en línea.

10.3.2.2. Resultados

La tabla 10.3 presenta los resultados obtenidos, donde se observa que el modo de ejecución que genera los resultados en un menor tiempo posible corresponde al modo Estático, y el mayor tiempo se encuentra asociado al modo de ejecución en línea. Dado que el sistema se encuentra en funcionamiento constantemente respecto a la cantidad de imágenes que el usuario ha decidido capturar en el modo en Línea.

Es importante resaltar que el modo de ejecución planteado en el objetivo principal de este trabajo de grado es el que presenta los mejores resultados respecto al tiempo de ejecución.

Tiempos de ejecución			
Modo de operación	Estático	Dinámico	En Línea
T (s) x imagen	1.5	11	14

Cuadro 10.3: Resultados de tiempo de la ejecución del sistema en segundos.

10.4. Evaluación Cualitativa del Sistema

En esta sección se busca analizar y evaluar el sistema desarrollado como componente interactivo de los entornos geográficos virtuales por parte de usuarios.

10.4.1. Ensayos Prácticos por los Usuarios

Para esta evaluación se realizaron pruebas con 20 usuarios, con edades entre los 21 y los 36 años de ambos sexos, entre ellos estudiantes de doctorado, estudiantes de maestría y

estudiantes de pregrado. De los 20 usuarios, 14 de ellos presentan conocimientos respecto a la interpretación de planos topográficos.

Se realizó una breve inducción del uso del sistema a cada usuario, estableciendo los requisitos y restricciones para que no se presentaran errores en su ejecución. Además, se permitió realizar pruebas sin límite de tiempo dejando la cantidad de repeticiones del uso del sistema a voluntad del usuario.

10.4.1.1. Procedimiento

Para probar el desempeño de la aplicación junto a la interfaz gráfica se evaluó la experiencia con 20 sujetos de prueba. El 65 % de estos sujetos de prueba son considerados potenciales usuarios del sistema ya que su formación está relacionada con las ciencias de la tierra, la cartografía, la topografía, sistemas de información geográfica e infraestructuras de datos espaciales. Los sujetos de prueba correspondiente al 35 % restante no tienen conocimientos en estas áreas pero sus capacidades en computación les facilita evaluar los tiempos de ejecución, el software desarrollado y la interfaz. Con lo mencionado anteriormente se garantiza que la aplicación fuera calificada en dos campos de desempeño: el que evalúa el potencial aplicativo del sistema y también la funcionalidad óptima del mismo.

Cada sujeto de prueba seleccionó un plano topográfico con el se quería ejecutar la aplicación. Este plano correspondía al modelo virtual que se visualizaba finalmente en el resultado y el cual permitía calificar la aplicación, de 1 a 5, en cada una de las tres funciones del sistema, Estática, Dinámica y en línea, en un formato de evaluación que se muestra en la Figura 10.4, en el que se considera el valor 1 como malo y 5 excelente.

Cuadro 10.4: Formato de evaluación de los ensayos prácticos por parte de los usuarios.

FORMATO DE EVALUACIÓN PARA LA VISUALIZACIÓN DE LAS SUPERFICIES VIRTUALES				
ATRIBUTO		ESTÁTICA	DINÁMICA	EN LÍNEA
1	Tiempo de Ejecución.			
2	Luminosidad requerida.			
3	Posición de Cámara y Plano.			
4	Velocidad de Procesamiento.			
5	Apariencia visual Interfaz.			
6	Estabilidad del seguimiento.	N/A		
7	Precisión en unión con el plano.			
8	Posibilidad de interacción con el resultado.		N/A	
9	Sensibilidad al movimiento (Cámara y plano).	N/A		
10	Primera impresión visual y plano.			
TOTAL				

El formulario diseñado contiene 10 ítem de calificación en donde se pregunta por habilidades específicas de los tres métodos, en áreas de computación y ciencias de la información

geográfica. Con éste se busca medir el potencial de la herramienta como interpretador visual de entornos geográficos virtuales y sus respectivos tiempos de ejecución.

Para la función estática sólo se calificaba con un máximo de 40 puntos pues se anularon dos de los ítems de calificación por el motivo de que no aplicaban en este modo del sistema. De igual forma, para la función dinámica se eliminó un ítem calificando un máximo de 45 puntos, y para la función en línea se calificó con la totalidad de los ítems establecidos, contando con esto el máximo de calificación que era de 50 puntos.

Para conocer el comportamiento según el ítem de evaluación se sumó el valor de cada uno y se comparó respecto al resultado de todos los evaluadores.

10.4.1.2. Resultados

Cuadro 10.5: Porcentajes de satisfacción según atributo y modo de prueba.

Evaluación Según tipo de Prueba en %			
Modo de operación Estadígrafo	Estática	Dinámica	En línea
Promedio	91.48	81.52	85.90
Mínimo	72.50	57.78	68.00
Máximo	100.00	97.70	100.00
Desviación S.	8.78	9.25	9.23
Mediana	95.00	80.00	87.00

Estática

Las pruebas realizadas dejaron como resultado un valor promedio de 91.48 % de satisfacción para el desempeño de la función estática, ocupando el primer lugar entre los tres modos a evaluar, con valores máximos de 100 % y un mínimo de 72.50 % . Se establece que esta prueba obtuvo los valores más altos puesto que el procesamiento de una sola imagen por cada ejecución del programa requiere menor costo computacional, y por tanto, la interacción con el usuario es más rápida. Estos resultados en promedio mayores al 90 % permiten cumplir a cabalidad el objetivo general del trabajo de grado presentado.

Dinámica

La ejecución de la función dinámica obtuvo los resultados generales más bajos, con un promedio de desempeño del 81.52 %; igualmente sus valores de máximos y mínimos fueron parcialmente bajos comparándolos con la función estática. En este procedimiento los valores mínimos se relacionan con la calificación obtenida en el ítem de tiempo de ejecución y la estabilidad del seguimiento, debido a que los cambios bruscos en el vídeo generan errores en los resultados, y el procesamiento de cada uno de los frames del vídeo requiere un mayor costo computacional, puesto que se procesan 30 frames/sg.

En línea

La función en línea obtuvo un valor promedio de satisfacción de 85.90 %. Se establece que los valores evaluados que disminuyen el desempeño de la aplicación en este sistema son el tiempo de ejecución, estabilidad del seguimiento y la sensibilidad al movimiento, puesto que se debe ser más preciso a la hora de capturar las imágenes, teniendo la precaución de capturar sólo la plantilla de marcadores.

En los resultados que se obtienen por cada ítem teniendo en cuenta la calificación de todos los evaluadores, Figura 10.5, se observan los valores más bajos en los ítems de estabilidad del seguimiento y sensibilidad del movimiento con valores de 81.50 % y 79.90 % respectivamente. De igual forma, otros valores inferiores al 85 % son el tiempo de ejecución y la velocidad de procesamiento, que se ven afectados directamente por los tiempos en los que se desarrolla el procesamiento de la imagen.

Por otra parte, los valores con mejores resultantes son: luminosidad requerida con 88.00 %, posibilidad de interacción con el resultado con 87.90 %, precisión en unión con el plano con 87.37 %, y primera impresión visual del plano con 93.27 %. Finalmente se puede decir que son unos valores de calificación homogéneos pues no tienen un rango muy alto de diferencia entre el más alto y el más bajo.

El cuadro 10.6 presenta en su totalidad los porcentajes de satisfacción obtenidos.

Cuadro 10.6: Porcentajes de satisfacción por evaluador respecto a cada atributo.

Evaluación según ítem del formato por evaluador en %										
Ítem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Estadígrafo										
Promedio	84.43	88.00	86.50	83.93	86.30	81.50	87.37	87.90	79.90	93.27
Mínimo	66.67	60.00	66.67	73.33	60.00	60.00	66.67	58.00	50.00	73.33
Máximo	100.00	100.00	100.00	93.33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Desviación S.	7.95	13.78	10.73	6.90	14.76	12.26	11.60	13.05	13.77	9.18
Mediana	86.00	90.00	88.33	82.67	93.33	80.00	90.33	90.00	80.00	100.00

10.5. Conclusiones

- La calibración de la cámara como resultado arrojó valores del error del píxel correspondientes en X a 0.28277 píxeles y en Y a 0.22403 píxeles, corroborando que el proceso se encuentra dentro del rango de error permitido que es 0.33 píxeles y dejando así el camino abierto para utilizar los parámetros intrínsecos de la cámara.
- El clasificador de red neuronal que se utiliza permite establecer qué color corresponde a cada marcador en la imagen, asignándole una coordenada del mundo real establecida previamente. Este proceso tiene una efectividad de 99,9 % entrenado con 22.175 muestras de píxeles. El 0.1 % restante no influye de manera significativa en el sistema.

- Los ángulos de azimut y elevación, son las estimaciones de la orientación con la que el usuario desea ver el modelo virtual. El error promedio de la orientación para el azimut es de (+/-) 6° y para la elevación es de (+/-) 3.5° . Estos errores permiten que el usuario observe el modelo de manera apropiada.

11 Conclusiones

- Se diseñó un procedimiento para la fusión de ortofotos y nubes de puntos, para su visualización geo-referenciada en planos topográficos mediante técnicas de realidad aumentada como componente interactivo de los Entornos Geográficos Virtuales. Este procedimiento se ejecutó a través de una interfaz y una plataforma experimental. Este cuenta con tres modos de ejecución: estático, dinámico y en línea, con un porcentaje de satisfacción de 91.48 %, 81.52 % y 85.9 % respectivamente. Con tiempos de ejecución de máximo 15 segundos por cada imagen procesada en el modo de operación de mayor costo computacional, En Línea.
- Se realizó una revisión bibliográfica a través de la cual se establecieron las bases conceptuales, las teorías aplicadas y el estado del arte del proyecto alrededor de los temas del modelo de la cámara, reconocimiento de patrones y espacios de color.
- Se puso en funcionamiento el método basado en la integración de ortofotos consideradas como imágenes de campo, y se estableció como la superficie en formato CAD a las nubes de puntos correspondientes la zona de estudio.
- Se desarrolló un sistema de visualización como componente interactiva por medio de una plantilla de marcadores que permite cohesionar los sistemas coordenados virtuales y reales a través de cálculos de matrices de rotación y vectores de traslación.
- El sistema de visualización permite interpretar un modelo robusto, el cual se basa en la integración de nubes de puntos y ortofotos, y tiene en cuenta la perspectiva de la cámara desde la cual se captura el entorno real, mejorando así la información que presenta la plancha cartográfica a través del modelo virtual.
- La integración de la nube de puntos y la ortofoto es una metodología adaptada que permite la generación de un modelo cartográfico virtual, el cual se visualiza a través de un dispositivo reproductor de imágenes. En este se puede observar la posición estimada de la captura realizada a la plantilla de marcadores, obteniendo así la visualización de realidad aumentada como componente interactivo de los entornos geográficos.
- El cambio de espacio de color RGB a HSV, permite analizar los marcadores de colores disminuyendo significativamente interferencias debidas a la iluminación, significando esto que los datos obtenidos no difieren significativamente unos de otros independientemente de los ángulos de toma y la iluminación de captura.

- El clasificador de red neuronal que se utilizó permite establecer qué color corresponde a cada marcador en la imagen, asignándole una coordenada del mundo real establecida previamente, este proceso tiene una efectividad de 99.9 %, a partir de un dataset de 22.175 muestras de píxeles.
- El ensayo práctico por parte de los usuarios permitió obtener una calificación basada en las observaciones dadas por 20 evaluadores que utilizaron la herramienta y evaluaron en ella el desempeño en las áreas de las ciencias de la tierra y la computación. A través de estas se identificaron las características que disminuyen el desempeño como lo es el tiempo de ejecución del sistema en el modo de operación dinámico.
- La velocidad de los métodos para utilizar la herramienta desarrollada en este proyecto, difieren de la cantidad de imágenes que se tienen que procesar por separado, debido a esto la calificación del método estático en donde solo se procesa una imagen tiene un porcentaje de satisfacción del 94.77 %, obteniendo el porcentaje más grande, contrario a lo que se obtiene con el método dinámico en el cual se procesan los frames obtenidos por el vídeo, influyendo de este modo en el porcentaje de satisfacción del 85.96 %, el porcentaje mas bajo entre las encuestas realizadas por los evaluadores.
- El método dinámico en donde se procesan todas las imágenes obtenidas de un vídeo que se toma de la plantilla presenta un porcentaje de satisfacción del 85.96 %, lo que permite que este se considere uno de los modos de visualización con menor promedio de satisfacción obtenido, puesto que cada procesamiento tiene un peso computacional muy elevado, haciendo que el procesamiento sea lento hasta la entrega final de su resultado.
- Las observaciones de los usuarios se enfocaron en las velocidades de los vídeos que se generan en el modo de operación dinámico, pues el vídeo de entrada captura 30 frames/sg, mientras el vídeo de salida enseña 1 frame en dos segundos, de igual forma los usuarios hicieron referencia al largo tiempo de ejecución del modo de operación dinámico.
- Los tiempos de ejecución del sistema son menores en el modo de operación estático, 1.5 segundos por el procesamiento de cada imagen, puesto que solo se procesa una imagen por ejecución, contrario a lo que ocurre en el modo de operación en Línea con 14 segundos, donde el sistema se encuentra mostrando el resultado y a su vez ejecutando el sistema para obtener una nueva captura de imágenes.

12 Limitaciones

- El sistema desarrollado permite que se realicen cambios en el hardware siempre y cuando este cuente con la configuración requerida para su funcionamiento en el sistema.
- La utilización correcta de la herramienta se debe realizar con una cámara a la cual se le haya realizado el proceso de calibración, para obtener con ello el modelo interno de la cámara, de lo contrario no se mostrarán resultados aproximados en cuanto a la posición y orientación del modelo virtual respecto al punto donde se capturaron las imágenes de la plantilla de marcadores y la cartografía.
- En las capturas de las imágenes se deben incluir los ocho marcadores de colores, pues si en la imagen no se encuentran la totalidad de los marcadores no se podrán calcular los valores correspondientes a los ángulos de Euler y la posición de la cámara respecto al origen de coordenadas del mundo real, generando una visualización errada del resultado.
- La binarización de la imagen permite obtener la posición de los objetos en la imagen, por tanto si se realizan capturas en donde se visualicen zonas por fuera de la plantilla negra el algoritmo generara más objetos de los soportados por el proceso, y la asignación de coordenadas del mundo real a la imagen será errónea.
- La cámara utilizada tiene una baja resolución lo que conlleva a no permitir alejar en más de 1 metro el dispositivo de la plantilla, pues los colores secundarios y los primarios pasan a tener valores similares dado a la incidencia de brillo, que al ser capturado por el sensor de la cámara genera errores en el proceso de clasificación, independientemente de la transformación a HSV de la imagen.
- Los ángulos de elevación menores a 15° afectan el procesamiento de la imagen en la binarización, debido a que la perspectiva de captura genera uniones entre los marcadores de la plantilla y la cartografía análoga que se encuentra ubicada en medio de ellos.
- La interacción con todas las imágenes en el modo de operación EN LINEA no se permite pues cada imagen nueva que se captura sobrescribe el resultado anterior.

13 Trabajos futuros

Teniendo en cuenta los alcances y limitaciones del trabajo desarrollado, y pensando en la profundización en la temática de componentes interactivos de los entornos geográficos virtuales se proponen los siguientes trabajos como posibles perspectivas futuras:

- Realizar mejoras en cuanto a la calibración de la cámara: el objetivo a futuro es que se pueda evaluar el desempeño del sistema con diferentes cámaras, por tanto se debe incluir en la aplicación un procesamiento que permita realizar la calibración automática desde Matlab con imágenes capturadas desde el nuevo dispositivo de captura.
- Una de las principales restricciones que tiene la aplicación es que los 8 marcadores deben aparecer en las capturas. Por tanto se propone eliminar los marcadores de colores y trabajar con descriptores sobre la misma cartografía, estos directores pueden ser: SURF, DAISY, SIFT, entre otros. De esta manera se posibilita interactuar con el sistema sin necesidad de plantillas.
- Eliminar la plantilla de fondo negro para realizar la captura de imágenes sin restricciones debidas al entorno.
- Integrar en la interfaz gráfica la etapa de reconstrucción de la superficie a partir de los insumos, nube de puntos y ortofoto, con el fin de que el sistema se pueda implementar para cualquiera plano topográfico que cuente con estos.

Bibliografía

- Al-Qawasmi, J. (2005). Digital media in architectural design education: Reflections on the e-studio pedagogy. *Art, Design & Communication in Higher Education*, 4:205–222.
- Aliaga, J. (2014). Orígen de la geometría proyectiva: Renacimiento [Alumnos].
- Bobrich, J. & Otto, S. (2002a). Augmented maps. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4):502–505.
- Bobrich, J. & Otto, S. (2002b). Augmented Maps. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(4):502–505.
- Bouchlaghem, D., Shang, H., Whyte, J., ., & Ganah, A. (2005). Visualisation in architecture, engineering and construction (AEC). *International Journal of Automation in Construction*, 14:287–295.
- Callejas, M., Quiroga, J., & Alarcón, A. (2011). INTERACTIVE ENVIRONMENT FOR TOURIST SITES , IMPLEMENTING AUGMENTED. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 21(2):1–12.
- Carrasco, J. & Martínez, J. (2011). Reconocimiento de patrones. *Komputer Sapiens*, page 32.
- Chen, M., He, L., Lin, H., Zhang, C., & Hu, M. (2013). Real-geographic-scenario-based virtual social environments: integrating geography with social research. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40(6):1103–1121.
- Chi, H.-L., Kang, S.-C., & Wang, X. (2013). Research trends and opportunities of augmented reality applications in architecture, engineering, and construction. *Automation in Construction*, 33:116–122.
- Coelho, A. H. & Bähr, H.-P. (2005). Visualização de dados de CAD e LIDAR por meio de Realidade Aumentada. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pages 2925–2932.
- Doabelis, M. & Brinkis, J. (2006). Information Technology in Computer aided architectural design. In *12th international conference on geometry and graphics*, pages 1–10.
- Dong, S., Behzadan, A. H., Chen, F., & Kamat, V. R. (2013). Collaborative visualization of engineering processes using tabletop augmented reality. *Advances in Engineering Software*, 55:45–55.

- Fonseca, D., Martí, N., Redondo, E., Navarro, I., & Sánchez, A. (2014). Relationship between student profile, tool use, participation, and academic performance with the use of Augmented Reality technology for visualized architecture models. *Computers in Human Behavior*, 31:434–445.
- Fukuda, T., Zhang, T., & Yabuki, N. (2014). Improvement of registration accuracy of a handheld augmented reality system for urban landscape simulation. *Frontiers of Architectural Research*, pages 1–12.
- Gatt, I. (2012). DSD's Newsletter. <<http://www.dsd.co.il/newsletter/dsd266.pdf>>, page 266.
- González, C., Vallejo, D., Albusac, J., & Castro, J. (2011). *Realidad Aumentada Un enfoque Práctico con ARToolKit y Blender*.
- Hartle, R. I. & Zisserman, A. (2004). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. PhD thesis, Cambridge Univ. Press.
- Heikkila, J. & Silven, O. (1997). A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. In *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Hernández Muñoz, J. A. & Vélez López, C. L. (2006). *Diseño de un sistema computarizado que permita al individuo con disminución en los volúmenes y capacidades pulmonares con dificultad para el agarre recibir retroalimentación visual en el momento de realizar los patrones musculares respiratorios*. PhD thesis, Universidad del Valle, Colombia.
- Holloway, R. L. (1997). Registration Error Analysis for Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4):413–432.
- Huang, W., Sun, M., & Li, S. (2016). A 3D GIS-based interactive registration mechanism for outdoor augmented reality system. *Expert Systems with Applications*, 55:48–58.
- Jun, G. (2001). Virtual Terrain Environment - a New Annotation for Maps and the Cartography. *ICC*, pages 1–6.
- Khan, W., Raouf, A. A., & Cheng, K. (2011). Virtual Manufacturing. *Springer-Verlag*.
- Klinker, G., Stricker, D., & Reinert, D. (2001). Augmented Reality for Exterior Construction Applications. *Augmented Reality and Wearable Computers*, (1).
- Lara, L. & Villarreal, J. L. (2004). La realidad aumentada: una tecnología en espera de usuarios. *Revista Digital Universitaria*, 5:0–9.
- Lechner, M. (2013). ARML 2.0 in the Context of existing AR Data Formats. *Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS), 2013 6th Workshop on*, pages 41–47.

- Leguizamón, M. A., Gaviria, J., & Rodríguez, C. (2012). Sistema georreferenciado de realidad aumentada con dispositivos móviles para la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Vinculos*, 9(2):147–154.
- Lin, C.-Y., Chai, H.-C., Wang, J.-y., Chen, C.-J., Liu, Y.-H., Chen, C.-W., Lin, C.-W., & Huang, Y.-M. (2016). Augmented reality in educational activities for children with disabilities. *Displays*, 42:51–54.
- Lin, H., Chen, M., Lu, G., Zhu, Q., Gong, J., You, X., Wen, Y., Xu, B., & Hu, M. (2013). Virtual Geographic Environments (VGEs): A New Generation of Geographic Analysis Tool. *Earth-Science Reviews*, 126:74–84.
- Liu, K. & Hao, W. (2010). The Ontology of Virtual Geographical Environment. In *Geoinformatics, 2010 18th International Conference on*, pages 1–6.
- Malbos, A., Rodachel, W., De Lima, J., & Da Silva, J. (2014). Aplicação da Realidade Aumentada para simulação de experimentos físicos em dispositivos móveis. In *Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*, pages 231–235.
- Malek, S. & Belhocine, M. (2011). Tracking chessboard corners using projective transformation for augmented reality. In *Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*, pages 1–6.
- Moldovon, D. & Wada, T. (2004). A CALIBRATED-PINHOLE CAMERA MODEL FOR SINGLE VIEWPOINT OMNIDIRECTIONAL IMAGING SYSTEMS. In *International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 2977–2980.
- Murty, N. M. & Devi, S. V. (2011). *Pattern Recognition: An Algorithmic Approach*. Springer Science & Business Media.
- Nájera Gutierrez, G. (2009). *Realidad aumentada en interfaces hombre máquina*. PhD thesis, Instituto Politecnico Nacional México.
- Olalde, K., García, B. n., & Seco, A. (2013). The Importance of Geometry Combined with New Techniques for Augmented Reality. *Procedia Computer Science*, 25:136–143.
- Ortiz Rangel, C. E. (2011). Realidad aumentada en medicina. *Revista Colombiana de Cardiología*, 11(7):4–7.
- Patrone, M. (2013). Reconstrucción 3D Proyecto de tratamiento de Imágenes por Computadora.
- Peredo, A. & Redondo, E. (2011). Realidad aumentada para el diseño urbano. Un estudio de caso en el proyecto del Centro Cultural Universitario en Guadalajara. Mexico. *International Conference Virtual City and Territory. Centre de Política de Sòl i Valoracions*.

- Petrasova, A., Harmon, B., Petras, V., & Mitasova, H. (2014). GIS-based environmental modeling with tangible interaction and dynamic visualization. *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*.
- Polvi, J., Taketomi, T., Yamamoto, G., Dey, A., Sandor, C., & Kato, H. (2016). SlidAR: A 3D positioning method for SLAM-based handheld augmented reality. *Computers & Graphics*, 55:33–43.
- Pozzi, C. . (2012). The role of computer in the teaching of architectural project. In *International conference on artificial intelligence and soft computing, in lecture notes in information technology*, 12:414–419.
- Ripley, B. (1996). *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge University Press.
- Roncagliolo, P., Gonzáles, A., Orellana, A., & Massaro, P. (2007). Sistema de Realidad Aumentada para Planificación Neuroquirúrgica Basado en. *Jornadas Chilenas de Ingeniería Biomedica*, pages 1–4.
- Ruiz, A., Urdiales, C., Fernández-Ruiz, J., & Sandoval, F. (2004). Ideación Arquitectónica Asistida mediante Realidad Aumentada. *Innovación en Telecomunicaciones*, 1(1).
- Sánchez, J. R. & Borro, D. (2007). Automatic Augmented Video Creation for Markerless Environmet. In *In Poster proceedings of the 2nd international conference on computer vision theory and applications (VISAPP 07)*,, pages 519–522.
- Seo, D. W. & Lee, J. Y. (2013). Direct hand touchable interactions in augmented reality environments for natural and intuitive user experiences. *Expert Systems with Applications*, 40(9):3784–3793.
- Silva, F. & Silva, J. (2012). A REALIDADE AUMENTADA EM SMARTPHONES NA EXPLORAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESTATÍSTICAS E CARTOGRÁFICAS. *Bol. Ciênc. Geod*, 18(2):282–301.
- Simon, G., a.W. Fitzgibbon, & Zisserman, a. (2000). Markerless tracking using planar structures in the scene. *Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000)*, pages 120–128.
- Taketomi, T., Okada, K., Yamamoto, G., Miyazaki, J., & Kato, H. (2013). Geometric Registration for Zoomable Camera Using Epipolar Constraint and Pre-calibrated Intrinsic Camera Parameter Change.
- Uceda, S. (2014). *Uso de la Realidad Aumentada para facilitar la lectura e interpretación de planos*. PhD thesis, Universidad del País Vasco, España.
- Vélez Melo, N. J. (2009). *Sistema de robots móviles cooperativos de realidad aumentada*. PhD thesis, Universidad del Valle, Colombia.

- Wang, X. (2006). Using Augmented Reality to Plan Virtual Construction Worksite. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 4:501–512.
- Wang, X., Kim, M. J., Love, P. E., & Kang, S.-C. (2013). Augmented Reality in built environment: Classification and implications for future research. *Automation in Construction*, 32:1–13.
- Wilches, D. & Figueroa, P. (2011). *Visualización de información urbana georeferenciada por medio de Realidad Aumentada*. PhD thesis, Biblioteca on line Universidad de los Andes Bogotá, Colombia.
- Yang, M.-D., Chao, C.-F., Huang, K.-S., Lu, L.-Y., & Chen, Y.-P. (2013). Image-based 3D scene reconstruction and exploration in augmented reality. *Automation in Construction*, 33:48–60.
- Zhang, X., Wang, H., & Chen, Q. (2014). Evaluation of Color Space for Segmentation in Robot Soccer. *International Conference on System Science ang Engineering (ICSSE)*, pages 185–189.
- Zhang, Z. (2009). A Flexible New Technique for Camera Calibration. 1998(11):1330–1334.

ANEXO 1 Manual de usuario

Para el manejo de la interfaz gráfica de realidad aumentada se elabora el siguiente manual para conocer el funcionamiento de la aplicación.

1. Para iniciar la aplicación desde Matlab se ejecuta el GUI de la aplicación, el cual abre una ventana con la visualización de la imagen de la cámara, una serie de botones y 12 check box los cuales permiten implementar la aplicación, Figura 13.1.

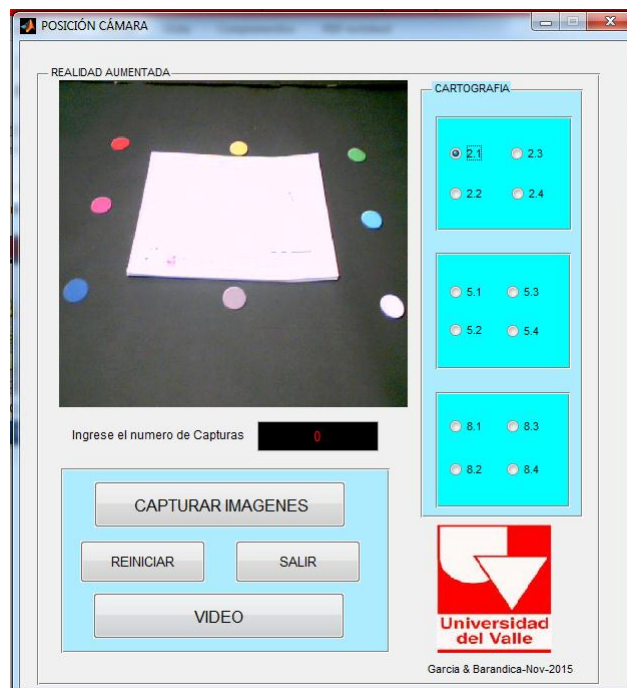


Figura 13.1: Interfaz gráfica del sistema.

2. Una vez se abre la aplicación el usuario debe tomar la decisión respecto a cuál de las cartografías utilizará para la visualización de su superficie virtual asociada. Los números que se encuentra a la izquierda en el check box son los que representan las cartografías, como se muestra en la Figura 13.2.

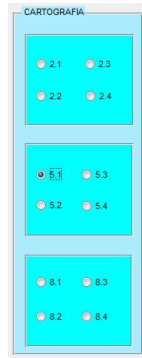


Figura 13.2: Módulo de selección de la cartografía a visualizar.

3. Una vez elegida la cartografía se debe elegir el número de capturas que se desean realizar con la cámara web, figura 13.3. Respecto al número de capturas ingresado la aplicación entra en modo estático o en Linea, puesto que si el usuario introduce un número de capturas mayor a 1 el sistema procede a tomar imágenes cada 5 segundos. Se debe de tener en cuenta que siempre la totalidad de los marcadores de colores deben de estar dentro de la capturas. Cuando el sistema finalice de capturar según el valor ingresado generará automáticamente el resultado donde se presenta la superficie virtual desde la perspectiva que se tomó, Figura 13.4.



Figura 13.3: Módulo de visualización de la cámara web y número de capturas realizadas.

4. El proceso de generación de vídeo corresponde al filme de un vídeo con la cámara moviéndose en las orientaciones que se considere, pero conservando los 8 marcadores y la plantilla negra dentro de la captura del vídeo, con esto se procesara la información y se entregará un vídeo con la superficie virtual generada desde las posición y orientación en que se colocó la cámara en el momento de captura, Figura 13.5.



Figura 13.5: Módulo de captura de video, modo dinámico.

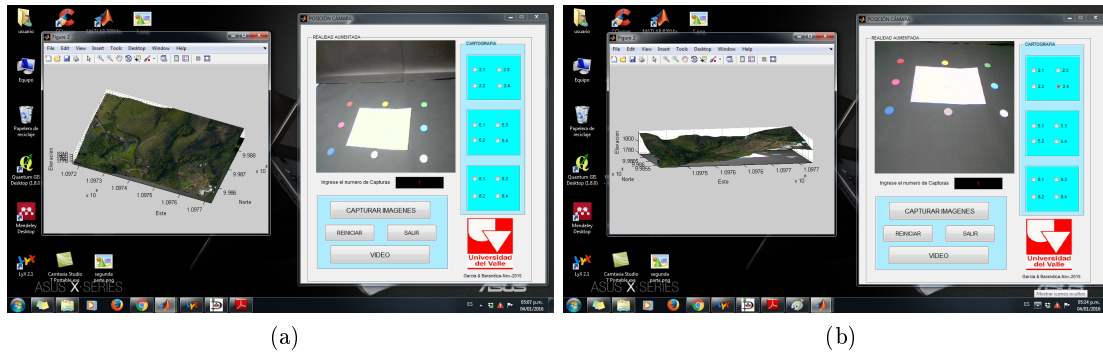


Figura 13.4: Resultados de la implementación de la aplicación de realidad aumentada.



Figura 13.6: Módulo de salida y reanudación.

5. Finalmente se encuentran los botones de reinicio y de salida, el botón de reinicio se puede utilizar en ocasiones en las que la aplicación ya haya sido utilizada y requiere de un nuevo proceso, también cuando se han tomado imágenes en donde la totalidad de los marcadores no se tenían en la imagen lo que conllevaría a generar un error, por otro lado el botón de salida solo cierra la aplicación totalmente, Figura 13.6.

Creado por García & Barandica en Noviembre del 2015.

Laboratorio de Visión Artificial, Ingeniería Electrónica, Universidad del Valle, Cali-Colombia.

Pregrado: Ingeniería Topográfica.

Trabajo de Grado: IMPLEMENTACIÓN DE REALIDAD AUMENTADA EN PLANOS TOPOGRÁFICOS COMO COMPONENTE INTERACTIVO DE LOS ENTORNOS GEOGRÁFICOS VIRTUALES.