

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GEOLOCALIZACIÓN EN  
INTERIORES PARA PLATAFORMA ANDROID VÍA LA RED  
ENTERPRISE WLAN DE LA PUCP

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Javier Eduardo Gáloc Vilca**

ASESOR: Cesar A. Santiváñez, Ph. D.

**Lima, Junio del 2016**

## Resumen

El trabajo realizado en la presente tesis consiste en el desarrollo e implementación de una aplicación en Android que sea capaz de geolocalizar a un usuario a través de su dispositivo móvil dentro de los pabellones del campus PUCP. La geolocalización es realizada a través de técnicas de localización y algoritmos matemáticos de estimación.

En el primer capítulo se da un vistazo a la evolución de la geolocalización y las plataformas tecnológicas móviles; también se ven algunos ejemplos de aplicaciones móviles actuales que utilizan la geolocalización en interiores (indoor); por ejemplo: Descubre PUCP y su problemática, que es vital para el objetivo principal de este proyecto.

El segundo capítulo aborda la parte de ingeniería: se describen y evalúan las técnicas de localización indoor más comunes con sus pros y contras; haciendo énfasis en el método fingerprinting y el estimador Maximum Likelihood. También se describen las tecnologías de radiofrecuencias más usadas en los métodos de localización, haciendo énfasis en la tecnología WiFi y las principales características relativas a la propagación de su señal.

En el tercer capítulo se lleva a cabo el análisis de la solución a implementar, se elige el diseño del sistema y se detallan los pasos que se siguen para su implementación. Con el análisis y el diseño hechos, se procede a la implementación de la solución que incluye la integración entre Android y Matlab.

Finalmente, en el cuarto capítulo se evalúa el desempeño de la solución implementada, se examinan los resultados de las pruebas en campo para hallar el error y se analiza cómo disminuirlo.



## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e Implementación de un sistema de geolocalización en interiores para plataforma Android vía la red Enterprise WLAN de la PUCP

Area Comunicaciones # 1303

Asesor Cesar A. Santiváñez, Ph. D.

Alumno : Javier Eduardo Gálvez Vilca

Código : 20040218

Fecha : 09/2015



## Descripción y Objetivos

En el año 2013, la Dirección Informática Académica (DIA) de la PUCP desarrolló la primera aplicación móvil lanzada por la universidad: Descubre PUCP. Descubre PUCP ha sido diseñada para dispositivos móviles con sistema operativo Android y brinda información relevante sobre lugares y eventos dentro del campus de la universidad; esto es posible mediante el uso de tecnologías de geolocalización outdoor (por ejemplo: GPS, LORAN, etc.).

Algunas de las funcionalidades de Descubre PUCP son: facilitar la navegación virtual dentro del campus, presentar los lugares de interés en un mapa y proveer una ruta al destino deseado. Estas funcionalidades dependen exclusivamente del alcance de la cobertura GPS, limitando su funcionamiento a rutas y entornos exteriores, a bajas resoluciones (precisión de decenas de metros en algunos casos) y a planos 2D, excluyendo entornos interiores en donde transcurre la mayor parte de la actividad cotidiana, donde se requiere mayor precisión (errores de localización del orden de 10 metros son inaceptables), trabajo con planos 3D (plantas y escaleras en edificios) y la cobertura GPS no está garantizada.

Existen diversas tecnologías para la geolocalización en interiores: red de telefonía móvil, bluetooth, sensores, WiFi, etc. Cada una con ventajas y desventajas entre resolución, alcance y costo. El campus de la PUCP se encuentra actualmente cubierto por una red Enterprise WLAN basada en 802.11 b/g/n/ac (WiFi) lo que permite usar la señal recibida (RSSI) para determinar la posición de un usuario móvil, usando la técnica de Huellas de Señal (fingerprinting) que minimiza el error en presencia de desvanecimiento debido a reflexiones y obstáculos. El método Fingerprinting requiere un levantamiento del mapa de atenuaciones de la red, trabajo realizado en paralelo a este.

El objetivo de la presente tesis es diseñar e implementar una aplicación móvil para dispositivos Android que sea capaz de geolocalizar al usuario dentro de un edificio del campus PUCP, aprovechando la infraestructura Wifi y usando la técnica de fingerprinting junto a las mediciones de señal de los Access Points más cercanos. Esta aplicación deberá ser integrable a la aplicación Descubre PUCP, permitiendo la navegación dentro del campus, inclusive en interiores (pisos, escaleras, aulas, etc.).

El desarrollo de la presente tesis implica: la recolección de muestras de RSSI en ambientes del campus PUCP, el diseño del sistema de geolocalización dentro de edificios, la implementación del algoritmo de localización basado en fingerprinting, y las pruebas de funcionamiento de la aplicación desarrollada en dispositivos Android.

MÁXIMO 50

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAM. Sc. Ing. JUEL ANGEL CATANO SANCHEZ  
Comisario de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

Título : Diseño e Implementación de un sistema de geolocalización en interiores para plataforma Android via la red Enterprise WLAN de la PUCP

**Índice**

Introducción

1. Geolocalización/Navegación en interiores y aplicaciones móviles
2. Técnicas en el campo de geolocalización en interiores
3. Analisis, diseño e implementación de la aplicación
4. Ensayos y resultados del sistema implementado

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

M. Sc. Ing. MIGUEL ANGEL CATANO SANCHEZ  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS

## *Dedicatoria*

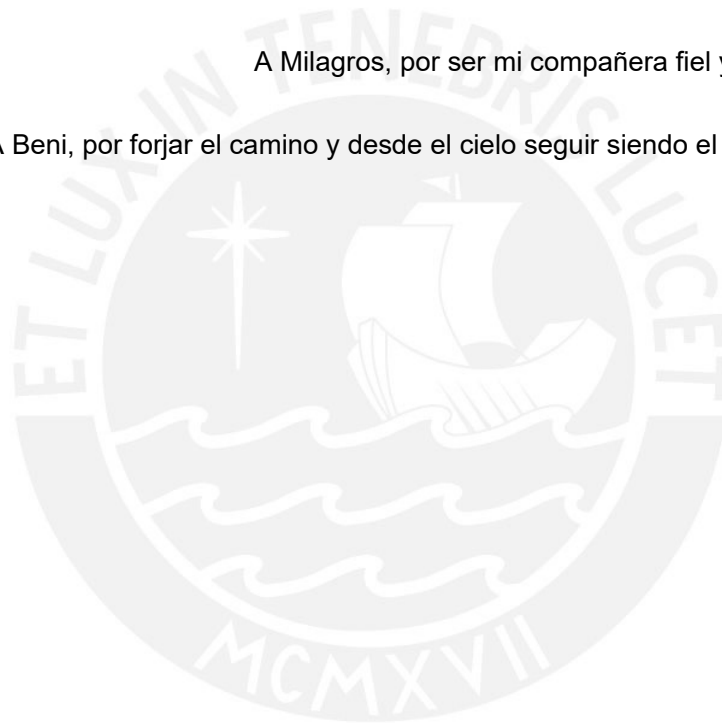
A Dios por bendecirme, guiarme e iluminarme en la realización de mi Tesis.

A mis padres, por su apoyo incondicional, paciencia y amor.

A mis hermanos, por ser ejemplos de perseverancia y unión.

A Milagros, por ser mi compañera fiel y nunca perderme la fe.

A Beni, por forjar el camino y desde el cielo seguir siendo el precursor de todo esto.



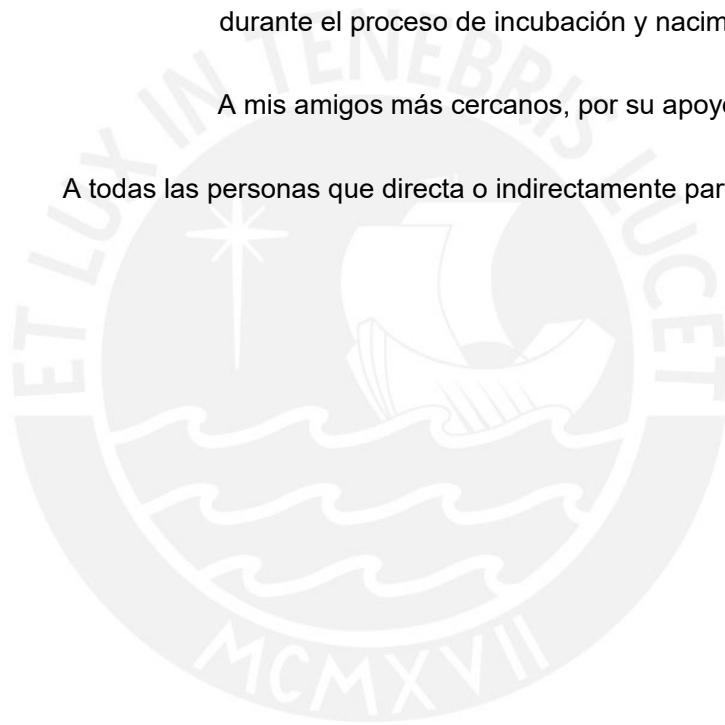
## *Agradecimientos*

A mis padres, por enseñarme a no desfallecer en la lucha por alcanzar la meta y por confiar en mí en los momentos más difíciles. ¡Lo logramos!

A mi asesor, Cesar Santivañez, por la paciencia y toda la sabiduría transmitida durante el proceso de incubación y nacimiento de este proyecto.

A mis amigos más cercanos, por su apoyo y palabras de aliento.

A todas las personas que directa o indirectamente participaron de esta Tesis.



<b>Contenido</b>	
Resumen .....	1
Lista de Figuras .....	4
Lista de Tablas .....	6
Introducción .....	7
<b>CAPÍTULO 1: Geolocalización/Navegación en interiores y aplicaciones móviles.....</b>	<b>8</b>
1.1. Antecedentes .....	8
1.1.1. Geolocalización en exteriores vs interiores .....	8
1.1.2. Aplicaciones y dispositivos móviles .....	8
1.1.3. Antecedentes históricos en el campo de la Geolocalización .....	10
1.2. Plataformas Tecnológicas Móviles.....	13
1.2.1. Android .....	13
1.2.2. iOS .....	14
1.2.3. Windows Phone .....	14
1.2.4. Blackberry OS.....	14
1.3. Situación actual.....	15
1.3.1. Mercado de Aplicaciones Móviles.....	15
1.3.2. Campos de aplicación de Geolocalización en Interiores .....	18
1.3.3. Aplicaciones de Geolocalización en Interiores en dispositivos móviles	23
1.4. Navegación en la PUCP (Descubre PUCP).....	27
1.5. Motivación .....	28
1.6. Objetivos .....	29
<b>CAPÍTULO 2: Técnicas en el campo de geolocalización en interiores .....</b>	<b>30</b>
2.1. Arquitecturas básicas de posicionamiento.....	30
2.2. Exactitud y precisión .....	31
2.3. Técnicas de localización según la magnitud física observable.....	32
2.3.1. Trilateración .....	32
2.3.2. Triangulación .....	33
2.3.3. RSSI .....	34

2.4.	Tecnologías de radiofrecuencia para localización .....	34
2.4.1.	Redes de comunicaciones móviles. Femtoceldas y LTE.....	34
2.4.2.	Redes inalámbricas de área local. WiFi y WiMAX.....	35
2.4.3.	Redes de área personal. Bluetooth y ZigBee .....	35
2.5.	Análisis de escenario - Fingerprinting .....	36
2.5.1.	<i>Estimador Maximum Likelihood (MLC)</i> .....	37
2.6.	Características relativas a la propagación de la señal de radio indoors ....	38
2.7.	Otras técnicas de localización indoor.....	39
2.7.1.	Beacons .....	39
2.7.2.	Sensores.....	40
2.7.3.	Luces de interiores (LED) .....	40
2.7.4.	Cámara (PDI).....	41
2.7.5.	Proximidad .....	41
CAPÍTULO 3: Análisis, diseño e implementación de la aplicación.....		42
3.1.	Elección del diseño del Sistema .....	42
3.2.	Representación de la localización.....	44
3.2.1.	Localización física o real.....	44
3.2.2.	Localización simbólica .....	44
3.3.	Localización indoor vía fingerprinting.....	45
3.3.1.	Fase de calibración u offline .....	46
3.3.2.	Fase de medición en tiempo real u online .....	54
3.5.	Implementación del sistema de localización .....	62
3.5.1.	Recolección de muestras y creación base de datos.....	62
3.4.2.	Aplicación Android .....	69
3.4.3.	Aplicación Matlab.....	73
CAPÍTULO 4: Ensayos y resultados del sistema implementado.....		81
4.1.	Pruebas de funcionamiento .....	81
4.2.	Conclusiones y Recomendaciones .....	96
Bibliografía .....		97

## Lista de Figuras

FIGURA 1: HTC DREAM FUENTE: [2] .....	9
FIGURA 2: NÚMERO DE APLICACIONES POR MERCADO MÓVIL FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	16
FIGURA 3: NÚMERO DE APLICACIONES DESCARGADAS POR AÑO FUENTE: ELABORACION PROPIA...	16
FIGURA 4: INGRESOS GLOBALES POR APLICACIONES FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	17
FIGURA 5: PARTICIPACION DEL MERCADO POR SISTEMA OPERATIVO MÓVIL FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	17
FIGURA 6: PUESTA EN ESCENA DE ARGUS FUENTE: [12] .....	19
FIGURA 7: DISTRIBUCION DE BEACONS DENTRO DE UN AMBIENTE FUENTE: [13] .....	19
FIGURA 8: DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE MYSOPHERA FUENTE: [14] .....	20
FIGURA 9: PLANO DE UN SUPERMERCADO FUENTE: [15].....	21
FIGURA 10: SEGUIMIENTO DE LA RUTA RECORRIDA POR UN CARRITO FUENTE: [15] .....	21
FIGURA 11: USO EN LA GANADERIA FUENTE: [16].....	22
FIGURA 12: INTERFAZ DE UNA APLICACIÓN EN MUSEOS FUENTE: [17].....	23
FIGURA 13: INTERFAZ DE SPARK COMPASS FUENTE: [17] .....	24
FIGURA 14: USO DE WIFISLAM FUENTE: [18] .....	25
FIGURA 15: INTERFAZ DE WIFARER FUENTE: [19] .....	26
FIGURA 16: INTERFAZ DE ESTIMOTE FUENTE: [20].....	27
FIGURA 17: INTERFAZ DE DESCUBRE PUCP FUENTE: [21].....	28
FIGURA 18: DIAGRAMA DE POSICIONAMIENTO REMOTO INDIRECTO FUENTE: [22] .....	30
FIGURA 19: DESCRIPCIÓN DE EXACTITUD Y PRECISIÓN FUENTE: [23].....	32
FIGURA 20: ESQUEMA DE LA TRILATERACIÓN FUENTE: [24] .....	32
FIGURA 21: ESQUEMA DE LA TRIANGULACIÓN FUENTE: [25].....	33
FIGURA 22: COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA DE LA SEÑAL CON RESPECTO A LA DISTANCIA DEL TRANSMISOR FUENTE: [27] .....	39
FIGURA 23: FACULTAD DE LETRAS Y CIENCIAS HUMANAS PUCP FUENTE: [21].....	432
FIGURA 24: ACCESS POINT CISCO AIRONET 3700I FUENTE: [28].....	43
FIGURA 25: REPRESENTACIÓN SIMBÓLICA DE AMBIENTES FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	435
FIGURA 26: DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO FINGERPRINTING FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	436
FIGURA 27: AMBIENTES ROTULADOS - SEGUNDA PLANTA DEL PABELLÓN H FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	437
FIGURA 28: DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS GEOGRAFICOS EN AULAS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	438
FIGURA 29: DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS GEOGRAFICOS EN CORREDORES FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	439
FIGURA 30: SOFTWARE AIRMAGNET SURVEY PROFESSIONAL FUENTE: [31] .....	50

FIGURA 31: ADAPTADOR USB ORINOCO PROXIM ORINOCO 8494 FUENTE: [32] .....	51
FIGURA 32: INTERFAZ CISCO PRIME FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	52
FIGURA 33: FORMATO VECTOR ALMACENAMIENTO DE MEDICIONES FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	53
FIGURA 34: PDF CASO I) FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	56
FIGURA 35: PDF CASO II) FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	56
FIGURA 36: PDF CASO III) FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	57
FIGURA 37: PDF CASO IV) FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	57
FIGURA 38: RESULTADO TEST K-S CASO I) FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	60
FIGURA 39: RESULTADO TEST K-S CASO II) FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	59
FIGURA 40: RESULTADO TEST K-S CASO III) FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	60
FIGURA 41: RESULTADO TEST K-S CASO IV) FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	60
FIGURA 42: PROCESO RECOLECCION MUESTRAS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	63
FIGURA 43: RECOLECCION DE MUESTRAS EN H11 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	63
FIGURA 44: EJEMPLO DE ARCHIVO SVD FUENTE: ELABORACION PROPIA.....	64
FIGURA 45: DATA FILTRADA EN EXCEL FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	646
FIGURA 46: EJEMPLO FORMATO BASE DE DATOS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	66
FIGURA 47: HISTOGRAMA COMPORTAMIENTO DESV. ESTANDAR EN FPS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	67
FIGURA 48: MATRIZ PG X AP FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	68
FIGURA 49: VECTOR PG CON INDICES FUENTE: ELABORACION PROPIA .....	68
FIGURA 50: VECTOR APS CON INDICES FUENTE: ELABORACION PROPIA.....	69
FIGURA 51: INTERFAZ DE LA APLICACIÓN DE ESCANEADO DE REDES FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA... 70	
FIGURA 52: RESULTADOS DEL ESCANEADO DE RED FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	71
FIGURA 53: DATA FILTRADA EN EXCEL FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	72
FIGURA 54: INTERFAZ APLICACIÓN ANDROID FUENTE: ELABORACION PROPIA.....	80
FIGURA 55: DETALLES MEDICIÓN AULA H-402 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	801
FIGURA 56: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 1.8, 0° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	83
FIGURA 57: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 1.8, 90° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	84
FIGURA 58: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 1.8, 180° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	85
FIGURA 59: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 1.8, 270° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	86
FIGURA 60: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 0° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	87
FIGURA 61: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 90° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	88
FIGURA 62: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 180° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	89
FIGURA 63: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 270° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	90
FIGURA 64: ESTIMACIÓN POSICIÓN PROMEDIO 100 MED FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	93
FIGURA 65: ESTIMACIÓN POSICIÓN CG DESV.EST 0 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	94
FIGURA 66: ESTIMACIÓN CG POSICIÓN DESV.ESTV 1.8 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	95

## Lista de Tablas

TABLA 1: CANTIDAD DE DISPOSITIVOS MOVILES VENDIDOS (2DO CUARTO 2015) FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	18
TABLA 2: CUADRO RESUMEN DE LAS TOPOLOGÍAS BÁSICAS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	31
TABLA 3: CARACTERÍSTICAS DEL ADAPTADOR USB ORINOCO FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	51
TABLA 4: DETALLES DEL PABELLÓN H FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	63
TABLA 5: NÚMERO DE MEDICIONES EN AULA H-402 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	82
TABLA 6: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 0° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	82
TABLA 7: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 90° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	83
TABLA 8: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 180° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	84
TABLA 9: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 270° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	85
TABLA 10: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 0° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	87
TABLA 11: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 90° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	88
TABLA 12: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 180° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	89
TABLA 13: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 270° FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	90
TABLA 14: COMPARACION POTENCIA Y CANALES DE TRANSMISION FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....	91

## Introducción

En el año 2013, la Dirección Informática Académica (DIA) de la PUCP desarrolló la primera aplicación móvil lanzada por la universidad: Descubre PUCP. Descubre PUCP ha sido diseñada para dispositivos móviles con sistema operativo Android y brinda información relevante sobre lugares y eventos dentro del campus de la universidad; esto es posible mediante el uso de tecnologías de geolocalización outdoor (por ejemplo: GPS, LORAN, etc.).

Algunas de las funcionalidades de Descubre PUCP son: facilitar la navegación virtual dentro del campus, presentar los lugares de interés en un mapa y proveer una ruta al destino deseado; estas funcionalidades dependen exclusivamente del alcance de la cobertura GPS, limitando su funcionamiento a rutas y entornos exteriores, a bajas resoluciones (precisión de decenas de metros en algunos casos) y a planos 2D; excluyendo entornos interiores en donde transcurre la mayor parte de la actividad cotidiana, donde se requiere mayor precisión (errores de localización del orden de 10 metros son inaceptables), trabajo con planos 3D (plantas y escaleras en edificios) y la cobertura GPS no está garantizada.

Existen diversas tecnologías para la geolocalización en interiores: red de telefonía móvil, bluetooth, sensores, WiFi, etc. Cada una con ventajas y desventajas entre resolución, alcance y costo. El campus de la PUCP se encuentra actualmente cubierto por una red Enterprise WLAN basada en 802.11 b/g/n/ac (WiFi) lo que permite usar la señal recibida (RSSI) para determinar la posición de un usuario móvil, usando la técnica de Huellas de Señal (fingerprinting) que minimiza el error en presencia de desvanecimiento debido a reflexiones y obstáculos. El método fingerprinting requiere un levantamiento del mapa de atenuaciones de la red, trabajo realizado en paralelo a este.

El objetivo de la presente tesis es diseñar e implementar una aplicación móvil para dispositivos Android que sea capaz de geolocalizar al usuario dentro de un edificio del campus PUCP, aprovechando la infraestructura Wifi y usando la técnica de fingerprinting junto a las mediciones de señal de los Access Points más cercanos.

## CAPÍTULO 1: Geolocalización/Navegación en interiores y aplicaciones móviles

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1. Geolocalización en exteriores vs interiores

Geolocalización es un término relativamente moderno que apareció a la par de los avances tecnológicos en el campo de la localización y hace referencia a la ubicación geográfica de un individuo u objeto que transmite coordenadas de su posición.

La geolocalización en exteriores de edificios se ha facilitado gracias al Sistema de Posicionamiento Global (GPS), que permite localizar a una persona u objeto en cualquier lugar del globo terráqueo con un error de precisión de unos pocos metros (7.8m en el 95% de los casos [1]); sin embargo, esta tecnología no es adecuada para interiores de edificios, donde transcurre la mayor parte de la actividad cotidiana, debido a la escasa o nula cobertura de los satélites GPS en este tipo de entornos, por lo que hay que recurrir a otras tecnologías para realizar esta geolocalización.

#### 1.1.2. Aplicaciones y dispositivos móviles

El teléfono móvil se remonta a la Segunda Guerra Mundial, donde se vio la necesidad de comunicación a distancia, razón por la cual Motorola creó un equipo militar llamado Handie Talkie H12-16 para comunicaciones entre tropas vía ondas de radio con banda de frecuencias menor a los 600 kHz.

Su salto a los sistemas civiles sucedió a finales de la década de los 40 con sistemas de radio analógicos en frecuencias FM y con servicios en las bandas HF y VHF ofrecidos por Bell, estos equipos que no tenían nada de “móviles”, por lo enormes y pesados, tenían el uso limitado a bordo de automóviles y con precios carísimos.

“¿A qué no sabes desde donde te llamo? Te llamo solo para saber si suena bien”, fueron las primeras frases pronunciadas el 3 de abril de 1973 en Nueva York por Martin Cooper, directivo de Motorola, a su competidor Joe Engel de AT&T (en ese entonces su mayor competidor en el sector), en la que se conoce como la primera llamada pública realizada desde un celular.

Una década después, luego de una inversión de 100 millones de dólares y años de investigación y desarrollo enfocados en mejorar la tecnología de los circuitos integrados y la duración de la batería, Motorola lanzó al mercado el primer teléfono celular de la historia: el Motorola Dynatac 8000x.

El 9 de enero de 2007, Steve Jobs anunció el primer Teléfono Inteligente (Smartphone) de Apple, el iPhone, un terminal que revolucionó por completo la industria de las telecomunicaciones y también de la computación, capaz de conectarse a la red inalámbrica WiFi y con pantalla multitáctil de 3.5 pulgadas que cubría toda la parte frontal del terminal, diseño que ha servido de inspiración para miles de modelos de smartphones posteriores.

Este fue el inicio de una de las tecnologías que mayor avance en búsqueda de innovación ha experimentado con el pasar de los años, convirtiéndose en un elemento indispensable en el día a día de las personas, asemejándose cada vez más a computadores personales, en términos de potencia y velocidad.

El 22 de octubre de 2008 fue lanzado el primer terminal móvil de comunicación en incorporar el sistema operativo móvil de Google (Android): el HTC Dream, conocido también como T-Mobile G1 y denominado popularmente Google Phone o GPhone; incorporaba una pantalla táctil junto a un teclado físico deslizable, sistema intuitivo de acceso instantáneo a información con unos cuantos toques de pantalla, acceso a 3G de alta velocidad y WiFi, capacidad de optimizar y personalizar el dispositivo mediante diversas aplicaciones, acceso directo a todas las aplicaciones de Google, tales como Gmail y Google Maps.



**FIGURA 1: HTC Dream**  
**FUENTE: [2]**

Las primeras aplicaciones móviles datan de finales de los 90', las que conocemos como agenda, juegos arcade (por ej. el juego Snake de Nokia), entre otros; cumplían funciones muy elementales, tenían diseño simple y poco atractivo.

La evolución de las aplicaciones (apps) creció con ritmo acelerado gracias a las innovaciones en tecnología WAP y la transmisión de datos (EDGE); a lo anterior se sumó la aparición del iPhone de Apple y el desarrollo del sistema operativo para móviles Android; así se dio inicio al boom de las aplicaciones móviles en diferentes campos: juegos, noticias, diseño, arte, fotografía, etc.

El surgimiento de las Tiendas de Aplicaciones (App Stores) catapultó el éxito de las aplicaciones móviles y cambio significativamente la manera en la que se distribuye y se comercializa el software en los smartphones.

### **1.1.3. Antecedentes históricos en el campo de la Geolocalización**

A medida que aumentaron las grandes expediciones marítimas fueron apareciendo diversos instrumentos de navegación, uno de los primeros fue el Astrolabio, invención griega utilizada para medir la posición de los cuerpos celestes; hacia finales del siglo XVI, se utilizaron el Cuadrante, usado para medir ángulos, y la Ballestilla, usada para medir la altura del sol y otros astros sobre el horizonte. Con estos instrumentos y las cartas de navegación se podían determinar el rumbo y la latitud, aunque de forma imprecisa.

La creciente importancia de la navegación marítima, llevó al perfeccionamiento de los instrumentos y a mediados del siglo XVIII se inventó en Inglaterra el Sextante, instrumento mecánico-óptico que reemplazo al astrolabio por tener mayor precisión y que permite medir ángulos entre dos objetos tales como dos puntos de una costa o un astro (tradicionalmente el sol) y el horizonte. Conociendo la elevación del sol y la hora del día se puede determinar la latitud a la que se encuentra el observador. Sin embargo, la determinación exacta de la hora se dio con la aparición de precisos Cronómetros, lo cual se dio a finales del siglo XVIII.

La combinación de estos instrumentos, las cartas de navegación y conocimientos avanzados de trigonometría, hicieron posible que los pilotos pudieran determinar su posición y su rumbo, en navegación marítima y aérea, hasta mediados del siglo XX.

Durante la Segunda Guerra Mundial surgió la necesidad de que los aviones bombarderos británicos no sólo trabajen a condiciones de clima ideales, si no también alcanzaran sus objetivos durante vuelos nocturnos o durante el día en presencia de nubes; fue así que en junio de 1940 la Royal Air Force (RAF) británica inició un estudio enfocado en la mejora de los sistemas de localización y orientación, proyecto denominado GEE.

Para entonces ya se conocían los principios de funcionamiento de los radares que permitían conocer la localización y la distancia a la que se encontraban los aviones en vuelo. Con los conocimientos adquiridos, se estableció un sistema de triangulación con tres estaciones-radar situadas a la mayor distancia posible entre ellas; los ecos de los pulsos reflejados por el avión permitían situar el mismo en una rejilla hiperbólica por la interacción de las señales reflejadas. Este procedimiento resultó seguro y las primeras operaciones importantes, como el bombardeo de la ciudad alemana de Essen, en marzo de 1942; haciendo que, para agosto de 1942, todos los cazabombarderos británicos contaran con este sistema de triangulación.

El campo naval no se quedó atrás, las marinas de guerra de Gran Bretaña y Estados Unidos iniciaron proyectos para la navegación basados en ondas radioeléctricas. Así se desarrollaron e implementaron varios sistemas: LORAN, OMEGA Y DECCA.

El desarrollo del sistema LORAN (del inglés Long Range Radio Aids to Navigation) comenzó en 1940 por parte del Departamento de Defensa de EEUU. Este sistema copió conceptos y se basó en el GEE británico y fue desarrollado en el Laboratorio de Radiación del MIT (Massachusetts Institute of Technology) y se convirtió en el primer sistema de posicionamiento que podía funcionar en cualquier condición meteorológica. Sin embargo, sólo podía determinar la posición en dos dimensiones: longitud y latitud. Los primeros resultados permitían fijar la posición de un navío con un error menor a 160 metros.

En octubre del año 1957 la Unión Soviética puso en órbita el primer satélite artificial: el Sputnik I; lo que motivó, entre otras acciones, que EEUU creará la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y el DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) para recuperar el terreno perdido en tecnologías del espacio y de defensa.

Las señales emitidas por el Sputnik podían utilizarse para fijar la posición del satélite y su órbita; se pensó en la utilización recíproca, es decir, determinar la posición del receptor en la tierra a partir de las señales del satélite y se iniciaron los estudios y proyectos para la navegación y localización basada en satélites. Por esta época también se desarrollaron los misiles nucleares intercontinentales, por lo que era de suma importancia conocer su trayectoria anticipadamente para poder destruirlos. Por todo esto, tanto la Marina como la Fuerza Aérea de EEUU centraron su investigación en el desarrollo de sistemas de navegación y localización basados en satélites.

En 1959 comenzó el estudio y desarrollo del sistema TRANSIT en la universidad John Hopkins, financiado por la Marina; fue el primer sistema de navegación satelital, pero de capacidades limitadas debido a que funcionaba sólo con cuatro o seis satélites en órbita polar muy baja (1074 Km). En 1964 realizó sus primeras mediciones, para la localización de submarinos con misiles Polaris. Posteriormente, en 1967, se autorizó su uso para fines civiles. En el año 1996 de discontinuo su uso.

El sistema TIMATION surgió debido a las limitaciones del sistema TRANSIT (que sólo determinaba la posición en el plano y no la altura y la distancia), fue desarrollado por la NRL (U.S Naval Research Laboratory) en 1964 y quedó operativo en 1967. La constelación de satélites, que llevaban relojes atómicos a bordo, permitía determinar la posición en tres coordenadas y la distancia.

En el mismo periodo, la Fuerza Aérea de EEUU estaba desarrollando otro sistema denominado 621B, que permitiría determinar la posición de un avión con una precisión de una centena de millar (16.09 m), en paralelo el Ejército estaba estudiando su propio sistema; para evitar el despilfarro de recursos, el Departamento de Defensa de EEUU decide en 1968 unificar estas iniciativas y crea un comité llamado NAVSEG (Navigation Satellite Executive Steering Group) cuyo objetivo era desarrollar el concepto de navegación vía satélite partiendo de las investigaciones hechas por la Marina y la Fuerza Aérea.

El resultado fue la definición de un nuevo concepto denominado NAVSTAR-GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging) que incorporó las mejores tecnologías de los proyectos existentes y fijaba una configuración que consistía en 24 satélites estadounidenses de navegación en órbitas inclinadas de 12 horas de periodo. El plan es aprobado en diciembre de 1973; la primera

fase del programa inicia en 1978, poniendo en órbita el primer satélite GPS, llamado NAVSTAR 1, el 22 de febrero.

Algunos años después la Unión Soviética inicia la implementación de su propio sistema de navegación satelital, el GLONASS (Global Navigation Satellite System), también integrado por 24 satélites.

Entre 1978 y 1985 fueron puestos en órbita 11 satélites GPS y los desarrollos y pruebas continuaban; en 1983, como consecuencia del derribo de un avión por las fuerzas soviéticas, el presidente Ronald Reagan sugirió extender el sistema GPS a la aviación civil cuando este estuviera completamente operacional, lo cual sentó un precedente para la migración de la tecnología militar al mundo civil.

Durante la Guerra del Golfo (1990 - 1991) el sistema GPS fue usado por primera vez en condiciones bélicas; el resultado fue exitoso y probó la eficacia del GPS para la localización táctica de unidades militares basándose en tecnología satelital.

En 1993 EEUU declaró formalmente la capacidad operativa inicial del GPS, que ya contaba con 24 satélites operacionales y 6 de reserva. Dos años después, el presidente Bill Clinton reafirmó el compromiso de proveer señal GPS a la comunidad internacional. Hacia el año 2000 la tecnología quedó universalizada.

## 1.2. Plataformas Tecnológicas Móviles

### 1.2.1. Android

Sistema Operativo desarrollado por Google y Open Handset Alliance, fue diseñado originalmente para dispositivos móviles y hoy su uso se extiende a tablets, relojes, televisiones y autos.

Fue un proyecto desarrollado inicialmente por la empresa Android Inc. (comprada el 2005 por Google), en el año 2008 se lanzó la versión 1.0; actualmente se encuentra en la versión 5.0 Lollipop. El sistema operativo tiene un núcleo basado en Linux con código abierto. Su SDK está conformada por un conjunto de APIs que dan acceso a todos los recursos del terminal, la programación es en Java sobre un entorno de desarrollo integrado como Eclipse o Android Studio (declarado IDE oficial por Google); también se puede programar en C/C++ por medio de las herramientas NDK [3].

Android ofrece como ventaja, respecto a su más cercano perseguidor, que para empezar a programar no es necesaria ninguna licencia; aunque si quisiéramos publicar nuestras aplicaciones en Play Store, necesitamos una licencia que cuesta USD 25 (pago único) [4].

### 1.2.2. iOS

Sistema operativo móvil desarrollado por Apple, diseñado para sus dispositivos iPhone, iPod Touch e iPad.

Su primera versión fue introducida en el año 2007 con el lanzamiento del iPhone 2G; actualmente se encuentra en la versión 9. Al igual que en las demás plataformas, los desarrolladores tienen a su disposición un SDK, su desarrollo es en lenguaje Objective-C.

El SDK de iOS obliga a usar un terminal de Apple, no haciendo posible el desarrollo de aplicaciones desde otro SO que no sea MacOS; además se necesita una licencia de desarrollador que tiene un costo de USD 99 (pago anual) [5].

### 1.2.3. Windows Phone

Sistema operativo móvil desarrollado por Microsoft, diseñado para dispositivos móviles. Sucesor del SO Microsoft Mobile (orientado al mercado empresarial), su primera versión (Windows Phone 7) fue lanzada a nivel mundial en setiembre del 2010, actualmente se encuentra en la versión 8.1.

El desarrollo de aplicaciones para esta plataforma se puede realizar en varios lenguajes, como C# o Visual Basic con XAML, JavaScript con HTML, o C++ con DirectX o lenguaje de marcado de aplicaciones extensible (XAML); se puede incluso escribir componentes en un lenguaje y usarlos en una aplicación escrita en otro lenguaje.

La licencia de desarrollador tiene un costo aproximado de 19 USD (pago único), el precio exacto varía dependiendo del país o la región [6].

### 1.2.4. Blackberry OS

Sistema operativo desarrollado por Research in Motion (RIM) para sus terminales, fue orientado inicialmente a negocios. Se introdujo por primera vez al mercado el año 1999 junto a su primer terminal: Blackberry 850, un dispositivo con teclado físico “qwerty” y un servidor de correo electrónico

Push, navegador de internet y demás características de un móvil de gama alta de la época, lo que lo convirtió rápidamente en un éxito en ventas.

El primer trimestre del 2013 se lanzó Blackberry 10 OS, sistema operativo cerrado multitarea construido en el QNX Neutrino RTOS, diseñado para smartphones y tabletas. Actualmente se encuentra en la versión 10.3.1.

Blackberry ofrece programación multilenguaje para el desarrollo de sus aplicaciones, se puede programar en C/C++/Qt, JavaScript/CCS/HTML, ActionScript/Air o Java Android, para lo cual existe un Native SDK.

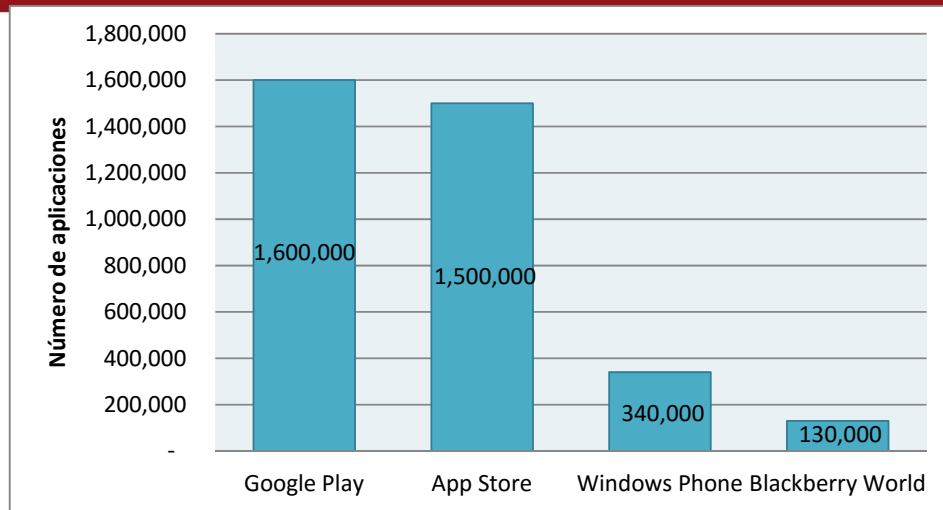
La licencia de desarrollador no tiene costo alguno. Blackberry revisa la aplicación y aprueba su publicación en Blackberry World [7].

### **1.3. Situación actual**

#### **1.3.1. Mercado de Aplicaciones Móviles**

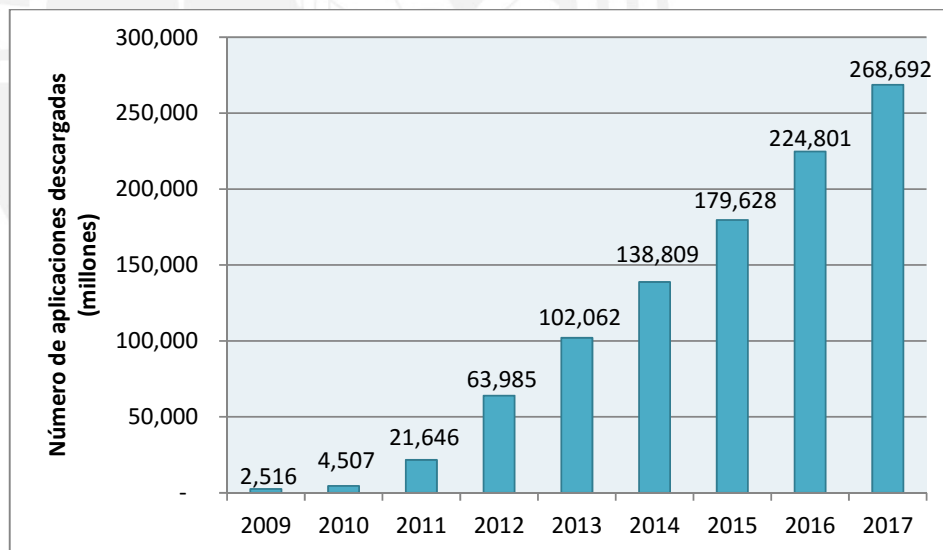
En la actualidad 4 compañías lideran las preferencias del mercado de Sistemas Operativos Móviles: Microsoft con Windows Phone, RIM con Blackberry OS, Apple con iOS y Google con Android; siendo estas 2 últimas las que dominan el mercado con una distancia abismal sobre el resto. Cada Sistema Operativo cuenta con su propia tienda de aplicaciones: Windows Phone Store (Windows Phone), Blackberry World (Blackberry OS), Apple App Store (iOS) y Google Play (Android).

En julio del 2015, Windows Phone Store contaba con más de 340,000 aplicaciones disponibles para descarga (entre gratuitas y de paga), Blackberry World con más de 130,000; App Store con más de 1,500,000 y Google Play superaba las 1,600,000 aplicaciones [8].



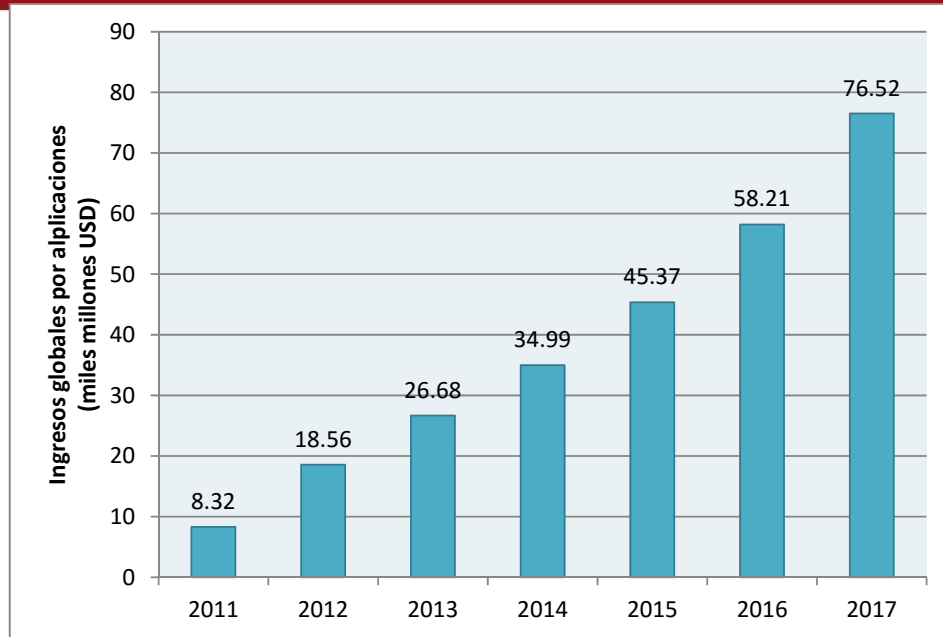
**FIGURA 2: NÚMERO DE APLICACIONES POR MERCADO MÓVIL**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En el 2009 se descargaron a nivel mundial aproximadamente 2.52 mil millones de aplicaciones, el año pasado las descargas llegaron a 138.81 mil millones; para el año 2017 se esperan alcanzar las 268.69 mil millones de descargas [9].



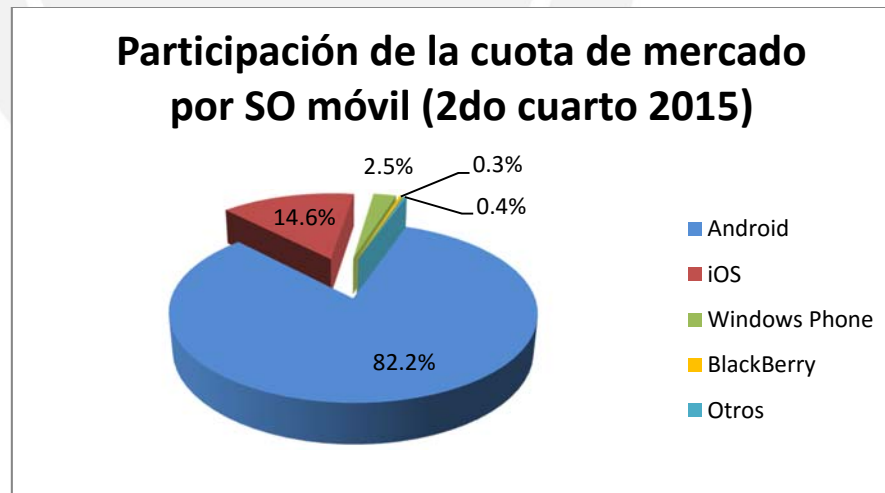
**FIGURA 3: NÚMERO DE APLICACIONES DESCARGADAS POR AÑO**  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

En el año 2012, los ingresos globales por aplicaciones móviles ascendieron a 18.56 mil millones de dólares americanos y se espera que en el 2017 la cifra llegue a un crecimiento de 76.52 mil millones de dólares americanos [10]. Estos ingresos son generados por concepto de descarga de aplicaciones, suscripciones y publicidad.



**FIGURA 4: INGRESOS GLOBALES POR APLICACIONES**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Al inicio de esta sección, se mencionó que son 4 los sistemas operativos móviles que se pelean por ser el número uno del mercado. A continuación se muestra la participación de cada uno en el mercado (al segundo cuarto del presente año) [11]:



**FIGURA 5: PARTICIPACION DEL MERCADO POR SISTEMA OPERATIVO MÓVIL**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede apreciar, el mercado de Sistemas Operativos Móviles tiene 2 grandes dominantes: Android y iOS, ocupando más del 96% del mercado entre los dos. El gran líder es Android con un 82.2% de cuota de mercado,

seguido de Apple con un 14.6%, tercero Microsoft con 2.5% y cerrando el podio Blackberry con tan sólo 0.3% de cuota de mercado.

Adicionalmente se muestra la cantidad de dispositivos móviles vendidos a los usuarios finales durante el mismo periodo (segundo cuarto del 2015).

**TABLA 1: CANTIDAD DE DISPOSITIVOS MOVILES VENDIDOS (2DO CUARTO 2015)**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Sistema Operativo	Dispositivos móviles vendidos (miles de unidades)
Android	271,010
iOS	48,086
Windows Phone	8,198
BlackBerry	1,153
Otros	1,229
<b>Total</b>	<b>329,676</b>

### 1.3.2. Campos de aplicación de Geolocalización en Interiores

La geolocalización en interior de edificios puede extenderse a diversos ámbitos de la vida cotidiana, como se observa a continuación:

- **Sociales:** Guiado de personas con problemas de movilidad, sistema de monitoreo continuo de niños en guarderías o localización de ancianos en una residencia; con lo cual se logra un aumento de independencia y autoestima de los usuarios y reducción del personal dedicado exclusivamente a vigilancia. Como ejemplos de aplicaciones en este campo se tiene a:
  - ARGUS, un innovador sistema que utiliza sonidos 3D y geolocalización mediante la triangulación de satélites GPS y que permite a personas invidentes o con problemas de visión moverse de forma autónoma y segura, ya que le ayuda a memorizar mentalmente el camino que debe realizar con precisión a través de sonidos 3D como chasquido de dedos, campanitas, notas musicales y similares; también puede ser usado en condiciones de baja visibilidad o en tareas de emergencia [12].



**FIGURA 6: PUESTA EN ESCENA DE ARGUS**  
FUENTE: [12]

- BeClose, un sistema de monitoreo inalámbrico que, con ayuda de sensores inteligentes distribuidos estratégicamente en ambientes de una residencia de ancianos, rastrea actividades y aprende rutinas cotidianas de las personas; para luego, a través de la red celular, mostrar reportes y notificaciones en tiempo real que serán administrados por el personal encargado del cuidado [13].



**FIGURA 7: DISTRIBUCION DE BEACONS DENTRO DE UN AMBIENTE**  
FUENTE: [13]

- **En hospitales:** Localización rápida de personal sanitario o equipamiento importante en emergencias, monitoreo de ubicación de los pacientes y todas las personas involucradas en el proceso asistencial; con lo cual se logra una respuesta más rápida y eficiente en la gestión de situaciones de emergencia. Como ejemplo se tiene a la siguiente aplicación:

- MySphera, un sistema de localización en tiempo real de pacientes, profesionales o activos de un hospital que, mediante la asignación de unos tags para la identificación (pulsera, tarjeta o etiqueta para equipos) con tecnología de radiofrecuencia RFID envían señales a balizas (beacons) que reciben las tramas y las envían a un servidor que ejecuta el algoritmo de localización para hallar la ubicación exacta [14].



FIGURA 8: DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE MYSPHERA  
FUENTE: [14]

- **En comercios:** Control de carros en supermercados, estudio de pautas de desplazamiento de clientes en grandes superficies; aplicable a estudios de mercado para disposición de productos de manera optimizada, determinación de patrones de compra para el posterior diseño de las tiendas, entre otras cosas. Tenemos por ejemplo a:
  - PacketTracker: Tecnología creada en el año 2005 que recopilaba patrones de compra dentro de un supermercado. Consistía en colocar etiquetas RFID en todos los carritos de compra de un supermercado, cada cinco segundos las etiquetas emitían una señal que era recibida por los receptores instalados en diversas partes del supermercado. Una vez recibidas las señales, estas servían para determinar la posición del carrito y grabar la ruta recorrida dentro de la tienda [15].

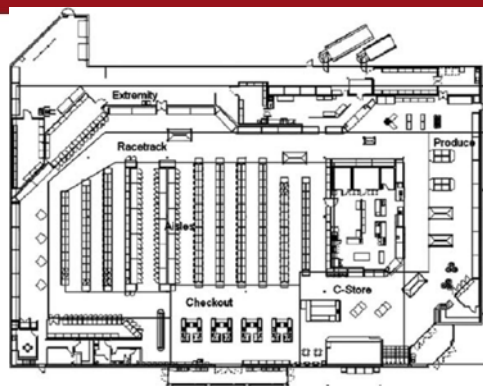


FIGURA 9: PLANO DE UN SUPERMERCADO  
FUENTE: [15]

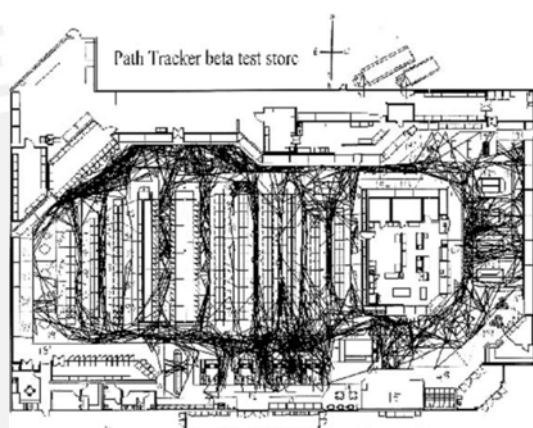


FIGURA 10: SEGUIMIENTO DE LA RUTA RECORRIDA POR UN CARRITO  
FUENTE: [15]

- **En producción:** Control de stock en almacenes, con ayuda de sensores que envían señales de alerta cuando se llega a un umbral límite, previamente configurado, de productos o se encargan de monitorear la movilización de productos dentro del almacén. Vigilancia de ganado, permitiendo que, mediante etiquetas colocadas en el ganado, se pueda hacer un monitoreo a la cantidad de animales y su ubicación física dentro del establo o granja sin necesidad de presencia física del pastor; permitiendo así, una mayor flexibilización de la jornada laboral y una mejor gestión del pastoreo [16].



FIGURA 11: USO EN LA GANADERIA  
FUENTE: [16]

- **En domótica:** Entornos conscientes del usuario (computación ubicua). Integración de los dispositivos alrededor de escenarios dentro de un edificio donde se encuentre localizado el ser humano, haciendo posible que este pueda interactuar con sus dispositivos y realizar cualquier actividad diaria de forma transparente e independientemente de sus computadores. Por ejemplo, un dispositivo de computación ubicua doméstico puede interconectar los sistemas de iluminación, calefacción y aire acondicionado con un controlador ambiente, de manera que en función de la etapa del día y de sus características (temperatura, nublado, despejado, etc.), este sistema reaccione autónomamente y pudiese variar la temperatura y condiciones de luz dentro de una vivienda o edificio, dependiendo del ambiente en el que este localizado el usuario, de una manera continua y transparente.
- **En seguridad:** Emergencias o catástrofes, la tecnología hace posible la localización de personas dentro de edificios; las coordenadas de ubicación son obtenidas con ayuda de la geolocalización en interiores, ahorrando recursos económicos y humanos que se pierden al no poder localizar correctamente las llamadas de auxilio (búsqueda debajo de los escombros luego de un terremoto por ejemplo); adicionalmente se puede armar un plan de evacuación que puede ser mostrado en un mapa interactivo e incluya la navegación de ayuda hacia las zonas más seguras.

- **Diversas edificaciones:** En universidades, museos, aeropuertos, etc. Localización interna de lugares o ambientes importantes (aulas, auditorios, obras de arte, puertas de embarque, entre otros) mediante una aplicación móvil y un plano precargado del edificio, adicionalmente se puede mostrar un mapa interactivo que incluya la navegación guiada dentro de los ambientes.



FIGURA 12: INTERFAZ DE UNA APLICACIÓN EN MUSEOS  
FUENTE: [17]

### 1.3.3. Aplicaciones de Geolocalización en Interiores en dispositivos móviles

La masificación de la tecnología GPS ha hecho posible el rastreo de vehículos y ha ayudado a los conductores a dirigirse a su destino. Sin embargo, actualmente, la tecnología está avanzando hacia el siguiente nivel de aplicaciones creativas de negocio; esta evolución es útil a las empresas por que las ayuda a hacer seguimiento de objetos y movilizarse en espacios interiores; también permite a asistentes a movilizarse dentro de edificaciones muy grandes (súper mercados, museos, hospitales, universidades, etc.).

A continuación se verán algunas de las aplicaciones que tienen o tuvieron presencia en el mercado:

- **SPARK COMPASS:** Plataforma de comunicación basada en el marketing de proximidad y soluciones inteligentes, presentada como una solución integral que incluye geolocalización en interiores a través

de balizas bluetooth de proximidad colocadas en lugares estratégicos (no es necesaria la conexión a internet); dependiendo de la localización del usuario, la aplicación mostrará información personalizada clave, detalles y promociones que le pueden interesar a través de un dispositivo móvil.

Por ejemplo, en el caso de un hotel, esta aplicación facilita al cliente navegar al interior del establecimiento hotelero y localizar servicios. Además, las balizas distribuidas en distintas estancias, como recepción, piscina o restaurantes permiten hacer de conocimiento a la administración del hotel la ubicación de sus clientes, conocer sus preferencias y enviarles mensajes personalizados [17].

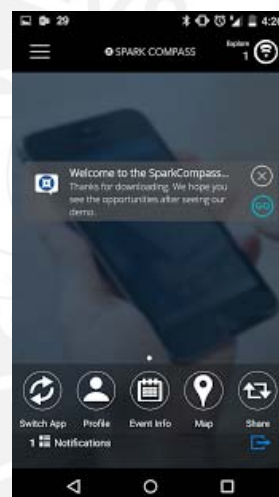


FIGURA 13: INTERFAZ DE SPARK COMPASS  
FUENTE: [17]

- **WIFISLAM:** Esta aplicación permitía al usuario determinar su localización dentro de un edificio (inclusive la localización de contactos) a través de su smartphone en tiempo real y con una precisión de 2.5m usando la infraestructura WiFi presente. Incluía navegación en interiores, red social basada en aproximación y la inclusión de publicidad personalizada cuando el usuario estaba próximo a alguna tienda con ofertas o descuentos personalizados.

El año 2013 Apple compró WiFiSLAM por USD 20 millones para integrarlo a su sistema de mapas [18].

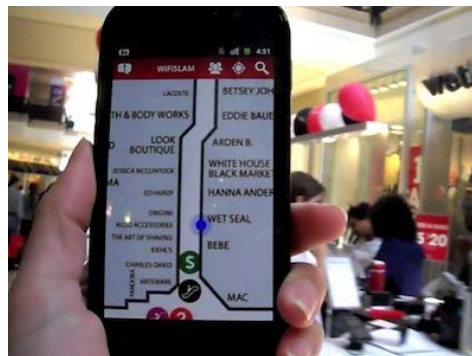


FIGURA 14: USO DE WIFISLAM  
FUENTE: [18]

- **WIFARER:** Aplicación de posicionamiento en interiores que, para determinar la posición del usuario de la forma más precisa, puede usar la infraestructura WiFi existente en un edificio o instalar balizas bluetooth. Brinda confiabilidad cuando el usuario cambia de piso, también integra información GPS para hacer viable y transparente la transición interior-exterior. Desarrollada para las plataformas iOS y Android, incluye como características:
  - Navegación desde ubicación actual a destino.
  - Directorios interactivos.
  - Promociones especiales y personalizadas para el usuario dependiendo de la ubicación actual.
  - Mapas actualizados [19].



FIGURA 15: INTERFAZ DE WIFARER  
FUENTE: [19]

- **ESTIMOTE:** Aplicación que permite estimar la posición y localización en interiores de forma precisa valiéndose de balizas electrónicas propias llamadas “Estimote Beacons” colocadas estratégicamente en las paredes de los ambientes de un edificio.

Los Estimote Beacons son pequeñas computadoras que tienen un potente procesador ARM, memoria interna, modulo bluetooth inteligente y sensores de movimiento y temperatura que se pueden colocar en cualquier sitio u objeto, tienen antenas internas que transmiten pequeñas señales de radio que son recibidas e interpretadas por el smartphone; con estas señales el smartphone puede saber la proximidad con objetos o lugares, reconocer el tipo, propietario, localización aproximada, temperatura y su función [20].

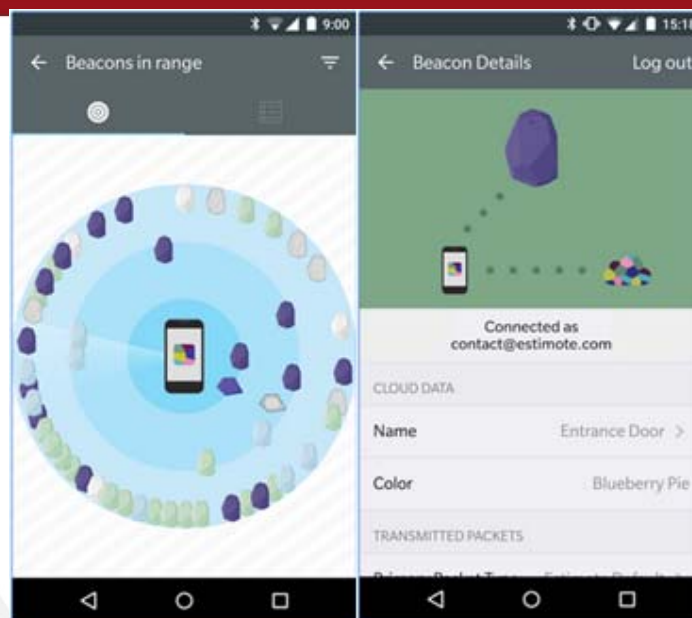


FIGURA 16: INTERFAZ DE ESTIMOTE  
FUENTE: [20]

#### 1.4. Navegación en la PUCP (Descubre PUCP)

Descubre PUCP es la primera aplicación móvil desarrollada por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) [21]. Es liviana, rápida, desarrollada para la plataforma Android (desde la versión 2.2) y sólo requiere una conexión a Internet para su funcionamiento.

Descubre PUCP ha sido diseñada para brindar información relevante sobre lugares y eventos dentro del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú; esto es posible mediante el uso de tecnologías de geolocalización y realidad aumentada, las cuales han sido aplicadas por el equipo de la Dirección de Informática Académica (DIA) para ser utilizadas por estudiantes, docentes y personal administrativo. También está disponible para visitantes de manera que puedan familiarizarse rápidamente con la universidad.

Con Descubre PUCP se puede:

- Acceder a la información de más de 200 lugares dentro la PUCP como facultades, bibliotecas, fotocopiadoras, auditorios, cafeterías, etc. Se pueden ver descripciones, fotos, horarios de atención, números o correos electrónicos de contacto, enlaces y lugares relacionados, entre otros.

- Navegar con realidad aumentada dentro de la PUCP o ver los lugares en un mapa, incluso se puede ver la ruta al destino elegido.
- Revisar una agenda de eventos destacados.
- Ver transmisiones en vivo de eventos académicos.
- Recibir notificaciones para próximos eventos según hora de inicio o proximidad.
- Ver la programación semanal de menús en cafeterías.
- Ver en tiempo real la disponibilidad de las computadoras de las aulas informáticas.

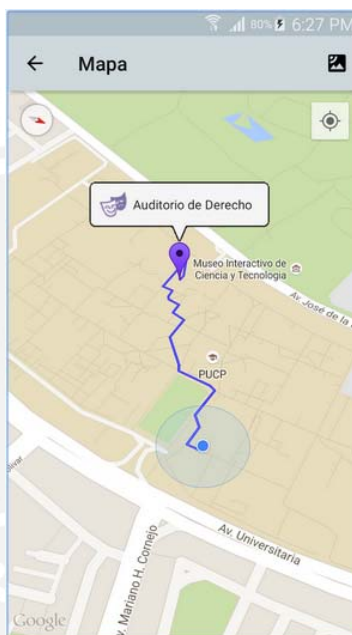


FIGURA 17: INTERFAZ DE DESCUBRE PUCP  
 FUENTE: [21]

### 1.5. Motivación

Gracias a la tecnología GPS ha sido posible el desarrollo de Descubre PUCP; sin embargo, debido a que dentro de edificios los satélites GPS no tienen suficiente cobertura o, si la tienen, no cuentan una precisión adecuada, haciendo que sus funcionalidades de geolocalización estén orientadas a ambientes externos.

Como vimos anteriormente, las plataformas móviles brindan una serie de posibilidades para los desarrolladores, desde precios razonables (licencia gratuita en el caso de Blackberry) a programación multilinguaje, lo que facilita el poder programar desde un único lenguaje para más de una plataforma; si a esto le sumamos la cantidad de aplicaciones móviles de geolocalización y navegación

en interiores que han aparecido, y la posibilidad de integrarlas a un nuevo desarrollo, es posible diseñar una aplicación para geolocalización en interiores dentro del campus PUCP, la cual es la motivación principal del presente trabajo.

### **1.6. Objetivos**

El objetivo de la presente tesis es diseñar e implementar una aplicación móvil para dispositivos Android que sea capaz de geolocalizar a un usuario dentro de un edificio del campus PUCP, aprovechando la infraestructura Wifi y usando la técnica de fingerprinting junto a las mediciones de señal de los Access Points más cercanos. Esta aplicación deberá ser integrable a la aplicación Descubre PUCP, permitiendo la navegación dentro del campus, inclusive en interiores (pisos, escaleras, aulas, etc.).

El desarrollo de la presente tesis implica: (i) la recolección de muestras de RSSI en ambientes del campus PUCP, (ii) el diseño del sistema de geolocalización dentro de edificios, (iii) la implementación del algoritmo de localización basado en fingerprinting, y (iv) las pruebas de funcionamiento de la aplicación desarrollada en dispositivos Android.

## CAPÍTULO 2: Técnicas en el campo de geolocalización en interiores

### 2.1. Arquitecturas básicas de posicionamiento

Los sistemas de posicionamiento se pueden clasificar en las siguientes cuatro topologías básicas [22]:

- a) Posicionamiento remoto: El transmisor de la señal es el terminal móvil y diversas unidades de medición fijas (p. ej. access points) reciben la señal de este. El resultado de todas las unidades de medición son recolectados y procesados en una estación o unidad de procesamiento que tiene como salida la localización del transmisor.
- b) Auto-posicionamiento: La unidad de medición es el terminal móvil, que recibe las señales de diversos transmisores (con localización conocida) y tiene la capacidad de procesar y evaluar su localización basado en las señales recibidas.
- c) Posicionamiento remoto indirecto: La medición sobre la señal recibida la realiza el terminal móvil y el resultado es enviado a una unidad de procesamiento remoto encargada de evaluar y calcular la localización.
- d) Auto-posicionamiento indirecto: Las mediciones la realizan las estaciones fijas y son enviadas al terminal móvil, que es el encargado de procesar las mediciones y calcular la posición.

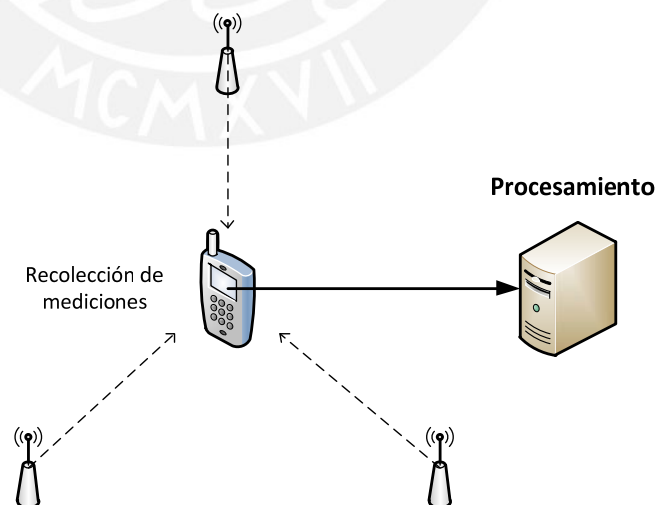


FIGURA 18: DIAGRAMA DE POSICIONAMIENTO REMOTO INDIRECTO  
FUENTE: [22]

TABLA 2: CUADRO RESUMEN DE LAS TOPOLOGÍAS BÁSICAS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TOPOLOGÍA	Realización de mediciones	Procesamiento de mediciones
Posicionamiento remoto	Estaciones base	Unidad de procesamiento
Auto-posicionamiento	Terminal móvil	Terminal móvil
Posicionamiento remoto indirecto	Terminal móvil	Unidad de procesamiento
Auto-posicionamiento indirecto	Estaciones base	Terminal móvil

## 2.2. Exactitud y precisión

Dentro de las métricas para evaluar la calidad de un sistema de posicionamiento existen dos conceptos fundamentales: exactitud y precisión; aunque usualmente son usados en el mismo contexto, lo que causa confusión, tienen diferente significado.

Como se puede apreciar en la figura 18, la exactitud está definida como el grado de acercamiento de la estimación realizada por el sistema a la posición real de referencia (donde se encuentra el dispositivo a localizar); también es conocida como error de localización y es la métrica más importante en un sistema de posicionamiento.

Mientras la exactitud considera solamente el valor del error de la distancia, la precisión hace referencia a qué tan consistente es el funcionamiento del sistema. En la figura observamos que la precisión representa la desviación estándar en el error de la medida o lo que es lo mismo: el grado de dispersión de la medida ofrecida. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión.

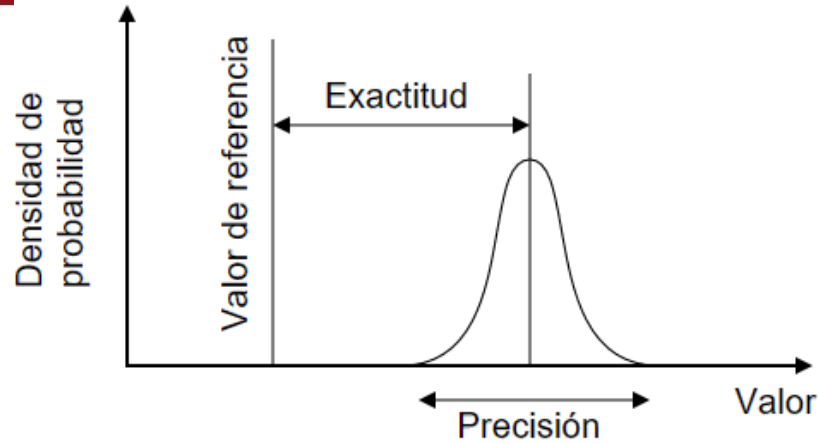


FIGURA 19: DESCRIPCIÓN DE EXACTITUD Y PRECISIÓN  
FUENTE: [23]

### 2.3. Técnicas de localización según la magnitud física observable

A continuación se describirán las principales técnicas de localización usadas en posicionamiento en interiores.

#### 2.3.1. Trilateración

Método geométrico que se basa en la medida de rangos. Permite calcular las coordenadas de un punto en el plano si es que se conoce la distancia del punto en cuestión a otros tres puntos de referencia (p.ej. access points) como mínimo. No debe confundirse con triangulación.

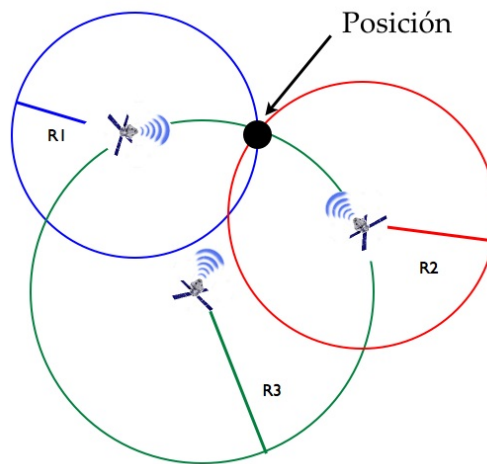


FIGURA 20: ESQUEMA DE LA TRILATERACIÓN  
FUENTE: [24]

Pertenecen a esta técnica:

- TOA  
Tiempo de llegada o tiempo de vuelo. La posición se estima a partir de las medidas del tiempo de propagación entre el receptor y las estaciones emisoras.
- TDOA  
Diferencia de tiempo de llegada. Similar a TOA, pero en este caso el cálculo para medir la posición se basa en las diferencias de tiempo de llegada de las señales procedentes de distintos emisores.
- ROTF  
Tiempo de retorno de la señal. Se basa en la medición del tiempo de transmisión de una señal desde que es enviada por el transmisor hasta que retorna al mismo, devuelta por el receptor.

Pros: Bajo nivel computacional del algoritmo. No necesita hardware adicional.

Contras: Necesidad de sincronización y de envío de marcas de tiempo en los datos para poder obtener precisión en las mediciones. El tiempo de procesamiento de la señal en el terminal móvil difiere entre distintos modelos, lo cual reduce la precisión y fiabilidad.

### 2.3.2. Triangulación

Método geométrico que se basa en la medida de ángulos. Hace uso de varios nodos fijos cuya posición es conocida, cada nodo fijo es capaz de determinar la dirección (ángulo) en la que se encuentra el punto a determinar.

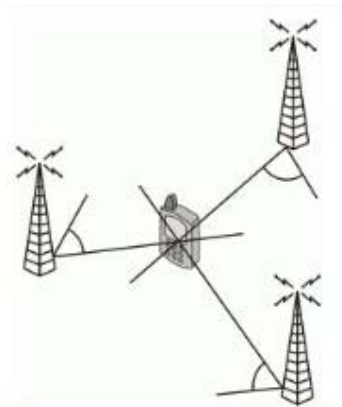


FIGURA 21: ESQUEMA DE LA TRIANGULACIÓN  
FUENTE: [25]

Pertenece a esta técnica:

- AOA/DOA  
Ángulo de llegada o dirección de llegada. La posición se halla por la intersección de varios pares de líneas de prolongación de ángulos, cada uno de ellos formado por el radio circular de la estación emisora hasta el receptor.

Pros: La estimación requiere sólo tres estaciones emisoras para posicionamiento en 3D o dos estaciones para 2D. No es necesaria la sincronización entre las unidades de medida.

Contras: La estimación se degrada conforme el terminal móvil se aleja de las estaciones emisoras. La exactitud se puede ver limitada por reflexiones multitrayecto causadas por señales no previstas o por obstáculos.

### 2.3.3. RSSI

La estimación se realiza a partir de la medida del nivel de potencia de la señal recibida. Partiendo de cada medida de potencia, se obtienen las pérdidas de propagación, y a partir de ellas la distancia a la que se encuentra el terminal móvil.

Pros: Bajo nivel computacional del algoritmo.

Contras: Necesidad de línea de visión directa (LOS) entre emisor y receptor, si se presentan efectos multipath se reduce la precisión.

## 2.4. Tecnologías de radiofrecuencia para localización

A continuación se indicaran y detallaran las principales tecnologías empleadas para localización en interiores basadas en radiofrecuencia (RF).

### 2.4.1. Redes de comunicaciones móviles. Femtoceldas y LTE

Una femtocelda es una estación base de móviles pequeña y diseñada, principalmente, para entornos interiores, ya sean residenciales, empresariales o comerciales. Conecta varios teléfonos móviles a la red del operador a través de una conexión de acceso fijo por banda ancha existente (DSL, fibra o cable). Apareció ante la necesidad de hacer frente a retos que acarrearán la cobertura en interiores; esto se hizo más común con la aparición de las redes de telefonía 3G, que usaba mayores frecuencias que

las generaciones anteriores, lo cual iba asociado a una menor penetración de la señal de radio al interior de edificios.

Las small-cells de LTE son una tecnología similar a la hora de realizar posicionamiento. Fueron diseñadas para proporcionar mejores prestaciones de cobertura y ancho de banda en interior de edificios; sin embargo, a diferencia de las femtoceldas que necesitan del apoyo de una red auxiliar para conectarse al núcleo de la red de móviles, la conectividad en la red LTE es totalmente IP.

#### **2.4.2. Redes inalámbricas de área local. WiFi y WiMAX**

La tecnología WiFi está bastante extendida a nivel mundial, también conocida como WLAN (Wireless Local Area Network o Red Local de Área Inalámbrica) es usada habitualmente para ofrecer conectividad por radiofrecuencia, con alcance local a un dispositivo que envíe datos Ethernet desde la ubicación del mismo hasta una conexión a la red fija de datos a través de cobre o fibra. Su funcionamiento se define en el estándar IEEE 802.11 operando en los rangos de frecuencia de 2.4 y 5 GHz y tiene un alcance medio entre 30 m (para interiores) y 100 m (para exteriores).

WiMAX, por sus siglas en inglés Worldwide Interoperability for Microwave Access (interoperabilidad mundial para acceso por microondas), utiliza ondas de radio en las frecuencias 2.3, 2.5 y 3.5 GHz y puede tener una cobertura de hasta 50 km. Su funcionamiento se define en el estándar IEEE 802.16.

#### **2.4.3. Redes de área personal. Bluetooth y ZigBee**

Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2.4 GHz, basada en el estándar IEEE 802.15 y tiene un alcance promedio de 5 a 10 m.

A diferencia de WLAN, Bluetooth es un estándar mucho más “ligero” y altamente ubicuo, ya que está incluido en la mayoría de teléfonos móviles, tablets, entre otros.

Zigbee reúne un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radiodifusión digital de bajo consumo. Está basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal.

La velocidad de datos puede variar entre 20 y 250 kbps, para una cobertura de entre 1 y 100 m.

## 2.5. Análisis de escenario - Fingerprinting

Método que consiste en realizar un mapeo de datos relativos a las señales de radiofrecuencia que se pueden encontrar en un escenario, asociarlos a una localización y almacenarlos en una Base de Datos (fase offline); posteriormente, el usuario realiza un escaneo con su terminal móvil y compara las mediciones obtenidas en tiempo real con las almacenadas en la base de datos creada (fase online), para estimar la localización más probable. Para realizar esta estimación se pueden emplear diversos algoritmos.

Los principales algoritmos son:

- Método kNN (k vecinos más próximos): Es un algoritmo de coincidencia de patrones. Tiene como objetivo clasificar un nuevo usuario a partir de otro de su misma clase, que será aquel que tenga las características más similares al objeto a clasificar. El algoritmo KNN realiza la clasificación basándose en la mínima distancia entre una nueva consulta y cada uno de los datos que forman el conjunto de datos almacenados, Los k vecinos más cercanos serán los que correspondan con las k mínimas distancias obtenidas.
- Redes neuronales: Durante la fase offline, los valores de radiofrecuencia y sus correspondientes coordenadas de localización se adoptan como entradas y objetivos del sistema neuronal, con el propósito de “entrenar” el sistema y obtener los “pesos” apropiados. Durante la fase online, un árbol de decisión determina la posición en función de las medidas recolectadas.
- SVM (máquina de vectores de apoyo): Técnica de clasificación de datos por aproximación. Es una herramienta para análisis estadísticos y tiene un buen desempeño en muchas aplicaciones de clasificación. La LIBSVM (Una librería para SVM) es escogida como la herramienta que estimará la localización del cliente mediante la red WiFi [26]. Un proceso de clasificación usualmente envuelve datos separados en fases de entrenamiento y clasificación; cada instancia en la fase de entrenamiento contiene un “valor objetivo” (p.ej. clase a la que pertenece) y diversos “atributos” (p.ej. características de las variables observadas). El objetivo de

SVM es producir un modelo (basado en los datos de entrenamiento) que pueda predecir y clasificar los valores objetivos de los datos de muestreo dados sus atributos.

- SMP (menor polígono de  $M$  vértices): Técnica que compara separadamente valores medidos de RSS para cada localización con respecto a la señal de cada transmisor, suponiendo un total de  $M$  transmisores. Se generan polígonos de  $M$  vértices que incluyen al menos una localización candidato por cada Access Point; se promedian las coordenadas de los vértices del menor polígono generado, es decir, el que tiene el perímetro más corto, para generar la localización estimada.
- Métodos probabilísticos: Se aborda el asunto de posicionamiento como un problema de clasificación, determinando la posición del usuario a partir de diversas técnicas probabilísticas. Dentro de este método tenemos:

### 2.5.1. Estimador Maximum Likelihood (MLC)

Partiendo del teorema de Bayes que indica que la probabilidad a posteriori de  $\mathbf{x}$  dada la observación  $\mathbf{y}$  puede ser escrita como:

$$f_{x|y}(x|y) = \frac{f_{x,y}(x,y)}{f_y(y)} = \frac{f_x(x)f_{y|x}(y|x)}{f_y(y)} \quad (2.1)$$

Donde  $f_{x,y}(x,y)$  es la función de densidad de probabilidad (pdf) conjunta de  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{y}$ ,  $f_x(x)$  es la pdf a priori de  $\mathbf{x}$ , y  $f_y(y)$  es la probabilidad de la observación  $\mathbf{y}$ .

Si se asume que  $f_x(x)$  es constante independiente de  $\mathbf{x}$  (como sería el caso cuando  $\mathbf{x}$  es uniformemente distribuida, o cuando no se conoce la distribución a priori), y como  $f_y(y)$  no depende de  $\mathbf{x}$ , se tiene lo siguiente:

$$\hat{x}_{ML}(y) = \underset{x}{\operatorname{argmax}} f_{x|y}(x|y) = \underset{x}{\operatorname{argmax}} \frac{f_x(x)f_{y|x}(y|x)}{f_y(y)} = \underset{x}{\operatorname{argmax}} f_{y|x}(y|x) \quad (2.2)$$

Es conveniente definir la *función likelihood*  $\mathcal{L}(y|x) = f_{y|x}(y|x)$  y la función log-likelihood  $\Lambda(y|x) = \log \mathcal{L}(y|x)$ . Con lo cual se tiene:

$$\hat{x}_{ML}(y) = \underset{x}{\operatorname{argmax}} \mathcal{L}(y|x) \cong \underset{x}{\operatorname{argmax}} \Lambda(y|x) \quad (2.3)$$

El estimador ML es aquel que maximice esta función  $\mathcal{L}(y|x)$  o, lo que es equivalente, maximice su logaritmo  $\Lambda(y|x)$ .

Pros: Mismas ventajas que trilateración y triangulación. Tiene en cuenta los efectos multipath en entornos de propagación. No requiere LOS (línea de vista). No se necesita sincronización entre los emisores y receptores.

Contras: Las variaciones en el entorno pueden influir notoriamente, como interferencias en el proceso de localización, a excepción del problema de multipath. Cualquier cambio en el escenario implica la recalibración de la base de datos. La fase inicial de calibración puede resultar costosa (en horas hombre).

## 2.6. Características relativas a la propagación de la señal de radio indoors

Las técnicas anteriormente descritas, al trabajar con señales de radiofrecuencia, presentan características comunes y relativas a su propagación, las variaciones y ruidos intrínsecos asociados.

En relación a la propagación de las señales inalámbricas, la potencia de la señal recibida varía en función del espacio, el tiempo y la frecuencia; por eso la importancia de entender su comportamiento. Esta variación puede ser clasificada también como “fading” (desvanecimiento) y se divide en dos rangos: gran o pequeña escala.

Gran escala hace referencia a distancias grandes (10 – 100 m o más) e incluye dos fenómenos llamados “path loss” (perdidas de propagación) y “shadowing” (sombreado).

Path loss es la atenuación de la potencia en función del incremento de la distancia entre el receptor y el emisor. Está definida por la ecuación:

$$P_R = P_T G_R G_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2, \quad (2.4)$$

Donde  $P_R$  es la potencia recibida,  $P_T$  es la potencia de transmisión,  $G_R$  y  $G_T$  son las ganancias de las antenas receptoras y transmisoras respectivamente,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $d$  es la distancia entre el emisor y el receptor [27].

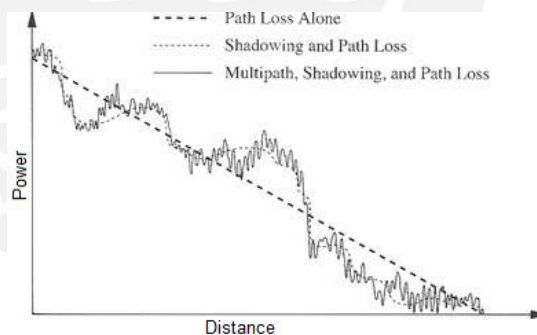
Si el único fenómeno que afectaría la potencia de transmisión de la señal WiFi sería el path loss, la localización podría ser determinada por la técnica de trilateración (método empleado por la tecnología GPS); sin embargo, muchos

objetos que existen en los ambientes interiores causan shadowing, que es la variación de la potencia de la señal debido a la absorción, reflexión, dispersión y difracción. Por ejemplo, las señales WiFi pueden ser absorbidas por algunas paredes y reflejadas por otras, también se pueden difractar en las esquinas.

Estos efectos causan variaciones impredecibles en la señal, haciendo de la trilateración y la triangulación, en este caso, técnicas inadecuadas.

Los efectos de propagación a pequeña escala ocurren en distancias mucho más pequeñas (menos de 1 m) y son causadas por la interferencia de las ondas de radio cuando se reflejan en objetos. Cuando una señal WiFi es reflejada por una pared e interfiere con la señal propagada, la señal recibida puede llegar amplificada o atenuada; tales variaciones "multipath" ocurren en el orden de la longitud de onda, que, por ejemplo, para una señal WiFi de 2.4 GHz es 12.5 cm.

La siguiente figura ilustra el comportamiento de la potencia de la señal con respecto a la distancia del transmisor y muestra los efectos de la propagación a gran y pequeña escala. Path loss únicamente causa un decrecimiento continuo en la potencia de la señal, shadowing y path loss (gran escala) causan variaciones fluidas en la señal, mientras que variaciones a pequeña escala (multipath, shadowin y path loss) causan fluctuaciones impredecibles.



**FIGURA 22: COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA DE LA SEÑAL CON RESPECTO A LA DISTANCIA DEL TRANSMISOR**  
FUENTE: [27]

## 2.7. Otras técnicas de localización indoor

### 2.7.1. Beacons

Tecnología que consiste en la instalación de beacons (balizas) en ambientes conocidos en los que se quiere implementar la localización. Los beacons transmiten señales de radiofrecuencia, bluetooth, radio de alta frecuencia u

otro tipo de señales con un identificador único de su posición (p.ej. coordenadas de referencia). Para estimar la localización exacta se puede utilizar el método de trilateración.

Pros: Se puede utilizar en cualquier parte, siempre y cuando se haya preparado el terreno con la instalación de los beacons. Es independiente del usuario.

Contras: Se requiere permiso en la zona en la que se quiera instalar. La instalación implica un costo por cada beacon instalado, lo que refleja menor escalabilidad, comparado con técnicas anteriormente descritas.

### 2.7.2. Sensores

Técnica basada en el uso de los sensores internos, implementados en la mayoría de los dispositivos móviles actuales: acelerómetro, giroscopio, compas y barómetro; por lo cual es una solución absolutamente viable hoy en día. Si se coge como referencia la latitud y longitud de una posición fija conocida, se puede estimar la ruta que sigue el móvil en base a la información que arrojan los sensores.

Pros: No se necesita hardware adicional. La posición del terminal no se vería afectada por cambios en el entorno. Independiente del usuario.

Contras: Elevado costo de la batería del terminal. Si se coge un punto de referencia erróneo, todo el trazado de la ruta hecho por los sensores será erróneo. Fallos que aparezcan en alguna de las etapas de la localización irán arrastrando errores a lo largo de las demás etapas, lo que se refleja en una posición final inexacta.

### 2.7.3. Luces de interiores (LED)

La iluminación por LED es una tecnología novedosa, aparecida en la última década, con muchas ventajas sobre las bombillas incandescentes como el ahorro del consumo eléctrico y mayor vida útil. Esta tecnología permite ser programada para emitir pulsos de luz en intervalos de milisegundos indetectables por el ojo humano, pudiendo aportar información mientras está iluminando. Gracias a la información proveniente de los LEDs, la cámara de un smartphone puede detectar los pulsos y aproximar su localización. Esta tecnología es usada en la actualidad, por ejemplo la empresa estadounidense ByteLight aprovecha la iluminación LED y en combinación con los sensores inerciales del móvil halla la localización.

Pros: La mayoría de smartphones cuentan con cámara. Si la iluminación LED está implementada, no se necesitaría hardware adicional.

Contras: Escalabilidad limitada, ya que, al ser una tecnología reciente, son pocas las edificaciones que tienen implementada la iluminación LED. Tecnología dependiente del usuario, debido a que éste debe dirigir la cámara del terminal móvil hacia la luz LED.

#### **2.7.4. Cámara (PDI)**

Se basa en procesamiento digital de imágenes. Se determina la localización del usuario procesando las fotografías tomadas por el móvil dentro de un edificio y comparando sus patrones con los patrones de imágenes almacenadas en una base de datos.

Pros: No hay necesidad de hardware adicional, ya que la mayoría de terminales móviles actuales cuentan con cámara.

Contra: Alto consumo de batería. Alto nivel computacional de algoritmo, ya que requiere conocimientos avanzados de procesamiento digital de imágenes y la implementación de realidad aumentada. Dependiente del usuario.

#### **2.7.5. Proximidad**

Algoritmos que proporcionan información de la posición relativa (p.ej. latitud y longitud en exterior de edificios) o simbólica (p.ej. habitaciones o corredores dentro de edificios), basándose en una densa red de antenas o sensores. Para cada objetivo móvil se asume la misma posición que tiene el sensor o la antena más próxima, que será la que reciba su señal con mayor potencia. Ejemplos de tecnologías que emplean esta técnica: Infrarrojos (IR) y los sistemas de identificación por frecuencias de radio (RFID).

Pros: Método simple de implementar. Puede ser implementado sobre diferentes medios físicos.

Contras: Para aumentar la exactitud, se debe aumentar la red de dispositivos de referencia.

## CAPÍTULO 3: Análisis, diseño e implementación de la aplicación

Luego de describir las técnicas de posicionamiento en interiores en el capítulo 2, se procederá a elegir la tecnología más adecuada para resolver nuestra problemática.

### 3.1. Elección del diseño del Sistema

Los escenarios de desarrollo del proyecto son cinco pabellones de alta prioridad definidos por DIRINFO (que constituyen el 20% de APs instalados en la red WiFIPUCP), estos pabellones son: Tinkuy, MC Gregor (edificios A y B), pabellón H, pabellón E (EEGGCC) y pabellón Z.

El escenario de implementación de la primera etapa de la solución es la facultad de Letras y Ciencias Humanas (pabellón H) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, la solución puede ser replicada posteriormente a los demás pabellones de interés.



**FIGURA 23: FACULTAD DE LETRAS Y CIENCIAS HUMANAS PUCP**  
FUENTE: [21]

Es un edificio que consta, entre otros ambientes, de 29 aulas de enseñanza y 1 aula que cumple la función de sala de grados, distribuidas en cuatro plantas. Las aulas y corredores están cubiertos en su totalidad por la red Enterprise WLAN con la que cuenta el campus PUCP.

El pabellón H cuenta con 32 access points CISCO modelo Aironet 3700i, que brindan cobertura WiFi y tienen las siguientes características:

- Soporte para estándares 802.11 a/b/g/n(2.0)/ac
- Banda dual 2,4 GHz y 5 GHz
- Multiple Input Multiple Output (MIMO) 4x3 (4 antenas para recepción y 3 para transmisión)



**FIGURA 24: ACCESS POINT CISCO AIRONET 3700I**  
FUENTE: [28]

Seleccionando la tecnología de radiofrecuencia WiFi en el presente proyecto, se evita incurrir en costos adicionales por despliegue de hardware (p.ej. beacons), ya que la infraestructura existente junto a un software realizarán la función; la información que se aprovechará será la medición de la potencia de la señal transmitida (RSSI) por los APs estáticos (32 en total) que se encuentran distribuidos en las aulas y corredores del pabellón, ya que la capa MAC proporciona información de la potencia emitida por los APs cada cierto periodo de tiempo.

Como se desea que a futuro nuestra aplicación sea integrable a la aplicación Descubre PUCP (1.4), que fue desarrollada en Android, conviene desarrollarla en la misma plataforma; para luego, con ayuda de “intents” (elemento básico de comunicación entre distintos componentes android; se pueden entender como los mensajes o peticiones que son enviados entre los distintos componentes de una aplicación o entre distintas aplicaciones), integrarla a Descubre PUCP, de esta forma se evita la integración del programa con otras plataformas móviles y el costo computacional que acarrearía esto. Adicionalmente, se sabe que Android es el sistema operativo con más presencia en el mercado (1.2.1) y para programar no hace falta adquirir una licencia (1.3.1).

Si a lo anteriormente explicado se suma que, a diferencia del iPhone o Windows Phone, Android permite recolectar información de la red WiFi, tales como RSSI y MAC de los APs que brindan cobertura (se verá más adelante cómo se logra esto); se refuerza la decisión de *usar Android como el SO en el que se desarrollará la aplicación*.

Respeto a la técnica de localización que se usará, triangulación y trilateración quedan descartadas por lo descrito en 2.6; por el contrario, fingerprinting constituye una buena alternativa para representar y procesar las medidas RSSI, y poder estimar la localización.

## 3.2. Representación de la localización

### 3.2.1. Localización física o real

Identifica las coordenadas del espacio en el que se encuentra el objeto móvil a posicionar, en dos dimensiones (2D) o tres (3D).

El sistema GPS, en exteriores utiliza como sistema de coordenadas la longitud y la latitud, referencias adecuadas para exteriores 2D, debido a la baja exactitud que se requiere para la localización; sin embargo, para interiores, se tiene un panorama distinto, ya que al tratarse normalmente de desplazamientos cortos o muy cortos, las coordenadas del orden de magnitud de latitud o longitud se ven representadas por valores muy pequeños.

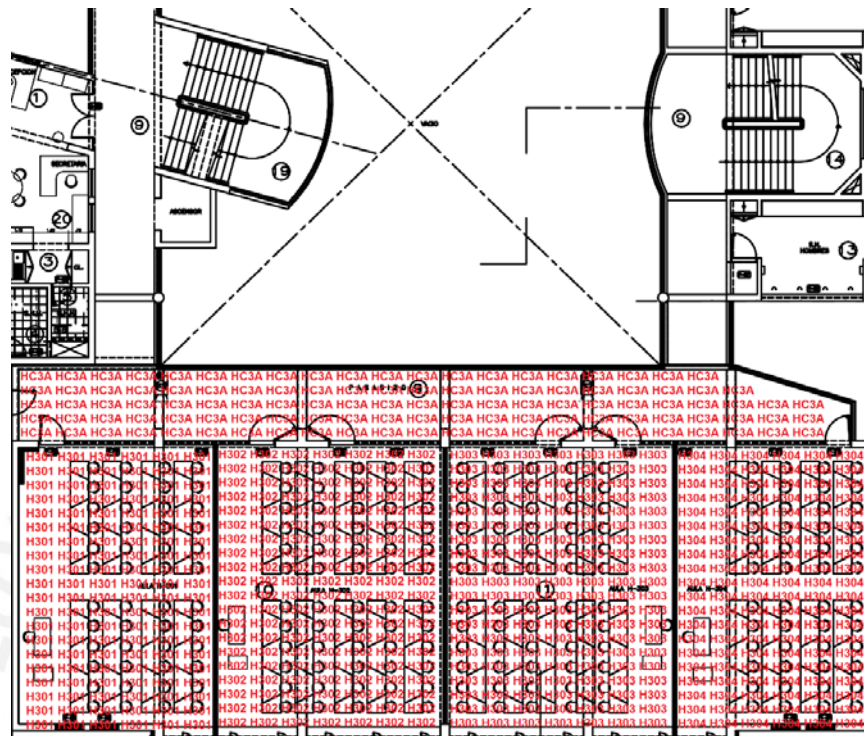
Adicionalmente a lo mencionado, un punto de complicación se añade en relación a la altura de la posición a buscar, variable fundamental para localizar dentro de un edificio de varias plantas. Haciendo que, en este caso, se haga indispensable la medición de coordenadas de forma relativa al propio edificio.

### 3.2.2. Localización simbólica

Se utiliza con la intención de simplificar el proceso del posicionamiento o con la intención de facilitar la tarea realizada por las aplicaciones que van a hacer uso de la información relativa a la posición, centrando los resultados relativos a la localización en aquellos aspectos que puedan resultar más importantes.

En la siguiente figura se expone un ejemplo de división por sectores. Es parte del plano de la 3era planta del Pabellón H del campus PUCP. Como podemos apreciar, se han tomado como ambientes de nuestro interés, las 4 aulas (H301, H302, H303 y H304) y el corredor (HC3A). Los ambientes

correspondientes a las escaleras y oficinas administrativas no han sido considerados.



**FIGURA 25: REPRESENTACIÓN SIMBÓLICA DE AMBIENTES**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El presente trabajo mostrará la localización simbólica del usuario, es decir, en qué punto de referencia dentro de qué ambiente del pabellón H se encuentra el usuario al momento de utilizar la aplicación móvil.

### 3.3. Localización indoor vía fingerprinting

La técnica de localización más adecuada para entornos interiores es la basada en Fingerprinting, ya que es probable que los únicos valores realmente válidos en ese tipo de escenarios sean los correspondientes a mediciones en la potencia de la señal recibida, RSSI.

El método fingerprinting básico fue mencionado en 2.3.3, ahora se hará un análisis más profundo y se explicará en detalle cómo será usado en el presente proyecto.

La siguiente figura ilustra el diagrama de funcionamiento del método.

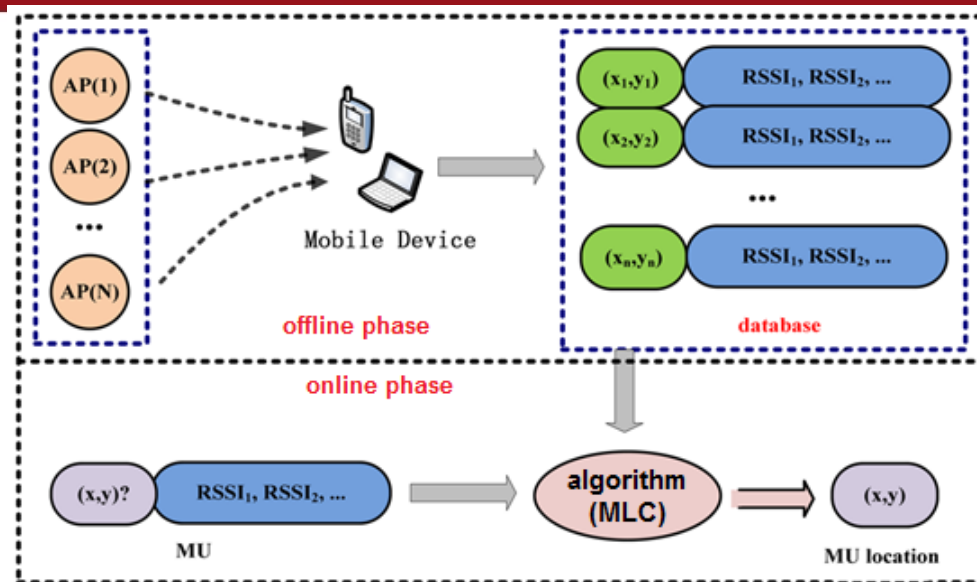


FIGURA 26: DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO FINGERPRINTING  
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede observar, consta básicamente de dos etapas: Fase de calibración (o fase offline), cuyo objetivo es generar las medidas de referencia que se almacenaran en una base de datos y Fase de medición en tiempo real (o fase online), durante la que se realiza la localización del terminal móvil mediante la comparación y análisis de las medidas obtenidas frente a las almacenadas en la base de datos offline con ayuda de un algoritmo.

### 3.3.1. Fase de calibración u offline

Esta fase consiste en la generación de una base de datos que almacenara las mediciones RSSI (en dBm) de los “ $n$ ” APs por punto de medición, esto será explicado con mayor profundidad en 3.2.1.2.

#### 3.3.1.1. Recolección de muestras

##### 3.3.1.1.1. Consideraciones

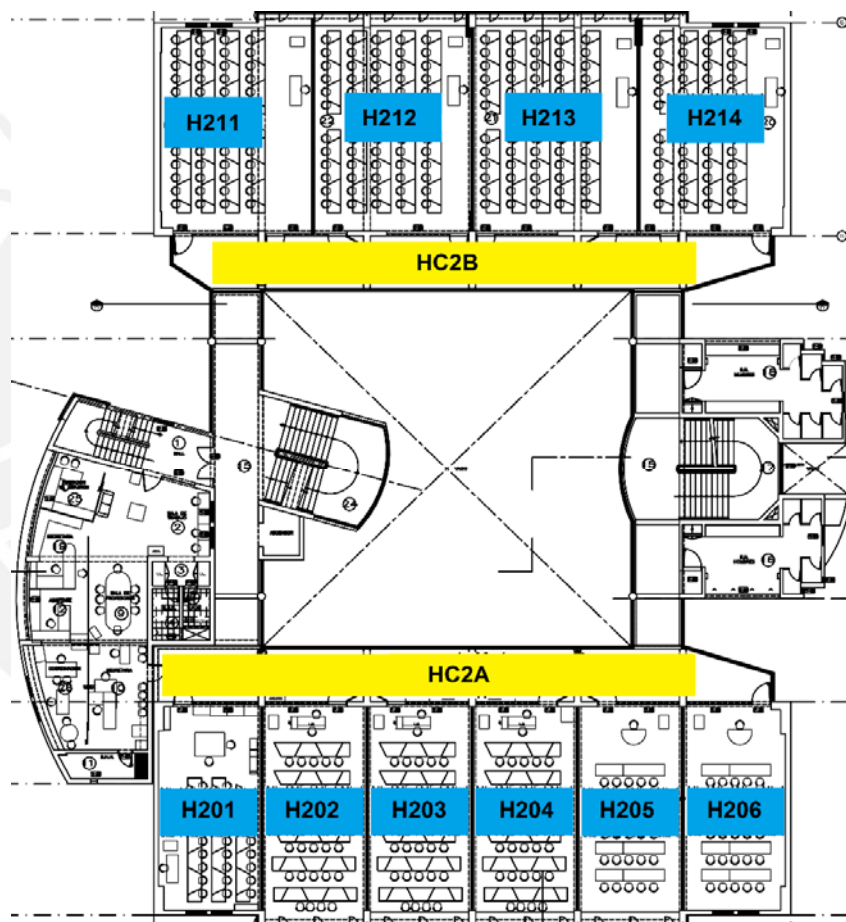
La recolección de muestras se realizó en trabajo conjunto con dos tesis de la carrera de Ingeniería de las Telecomunicaciones, que tuvieron como objetivo el levantamiento de mapa de atenuaciones de la señal electromagnética [29].

Se realizó la recolección en los 5 pabellones de interés, que, como se mencionó anteriormente, son los siguientes:

- Mc Gregor edificios A y B – Pabellón N
- Pabellón Z

- Pabellón H
- EEGCC – Pabellón E
- Edificio Tinkuy

Se describen a continuación las características del Pabellón H que es donde se realiza la primera etapa de la solución. Consta de 30 aulas de nuestro interés (29 salones de clases y 1 de grados) y 8 corredores, distribuidos en cuatro plantas (2 corredores por planta). En la siguiente figura apreciamos el plano de la segunda planta, aparecen rotulados y de color celeste o amarillo los ambientes de nuestro interés.



**FIGURA 27: AMBIENTES ROTULADOS - SEGUNDA PLANTA DEL PABELLÓN H  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA**

En este caso, se observa que la segunda planta del pabellón H consta de 10 aulas de estudio (H201, H202, H203...) y 2 corredores (HC2A y HC2B), en total 12 ambientes en donde se realizará la recolección de mediciones. Los demás ambientes (oficinas administrativas y servicios

higiénicos) no son parte de nuestro interés, por lo tanto no forman parte del alcance del presente proyecto.

El nombre de la red inalámbrica (SSID – Service Set Identifier) PUCP es “redpucp” y como se mencionó, tiene cobertura en todo el pabellón H; por lo que no habrá problema en escanearla dentro de nuestros ambientes de interés.

#### 3.3.1.1.2. Metodología de recolección

Dentro de cada ambiente se tomarán puntos geográficos (llamados de ahora en adelante PG), estos PG cubrirán todo el ambiente y la forma en que serán tomados dependerá del ambiente.

- Aulas

La distribución de los PG será hecha de tal manera que formen los vértices de un cuadrado de 1.20 m x 1 m y la cantidad de ellos dependerá de las dimensiones del ambiente, de acuerdo a la figura 28.

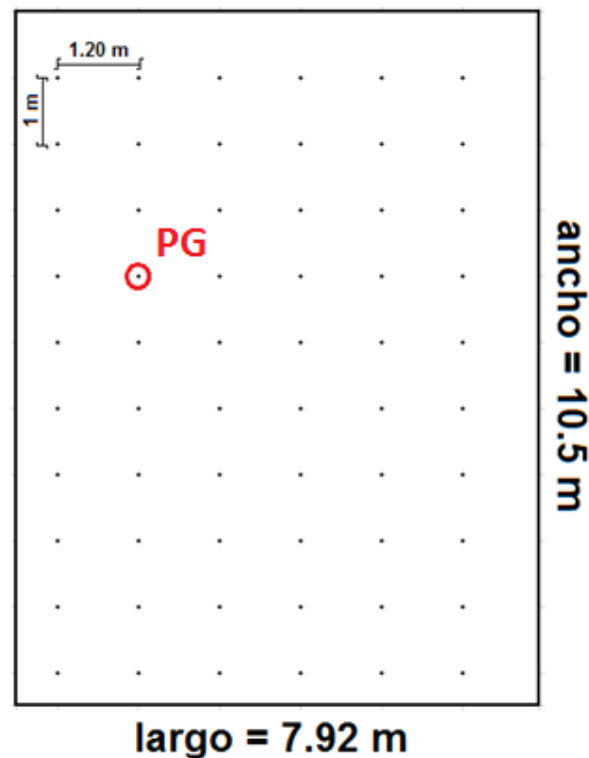
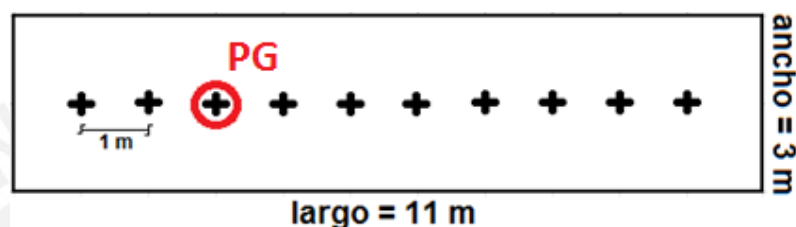


FIGURA 28: DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS GEOGRAFICOS EN AULAS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se observa, para este caso, el aula contendrá 60 PG (6 por largo y 10 por ancho).

- Corredores

En el caso de corredores, la distribución de los PG variará respecto a los salones, en este caso solo se tomara una hilera (ubicada a la mitad del corredor) y la distancia entre PG será de 1 m. Se esquematiza la idea en la figura 29.



**FIGURA 29: DISTRIBUCIÓN DE PUNTOS GEOGRAFICOS EN CORREDORES**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Según se puede observar, para este caso se tomarán 10 PG.

La recolección de mediciones será hecha con ayuda de una computadora portátil que tendrá instalado el software Airmagnet Survey Pro de Fluke Networks y un escáner de red USB (recomendado por el fabricante del software) que se detalla más adelante.

En cada medición se asegura tener el escáner USB a una altura tal que simule el uso de un terminal móvil por un usuario que está de pie. Considerando que el promedio de estatura peruano es de 1.57 m [30], esta altura será de 1.12 m aproximadamente.

Se realizaran 4 recorridos por ambiente, con lo cual se asegura tener 4 mediciones por PG, esto ayudará a analizar cómo varía la potencia de la señal y a hallar la media y la desviación estándar por PG y por AP, valor que será usado en el algoritmo de localización que se verá posteriormente.

### 3.3.1.1.3. Programas y equipos empleados

Los equipos tecnológicos y el software que serán detallados en las siguientes líneas fueron adquiridos por la Dirección de Informática de

la PUCP (DIRINFO) y facilitados para el proceso de recolección de mediciones.

- AirMagnet Survey Professional  
Software del tipo “survey” desarrollado por Fluke Networks, permite estudiar y analizar sitios inalámbricos. Entre otras características, permite recolectar mediciones en diversos puntos del ambiente de interés; para lograr esto, se requiere importar los planos de los ambientes a medir (en formato de imagen o CAD).

El plano importado deberá ser calibrado con las dimensiones de largo y ancho en metros. Es sobre este plano que se muestrea la señal, haciendo clic en los puntos de interés, que se convertirán en los fingerprinting.

El software escanea en ambas bandas (2.4 y 5 GHz) y permite el filtrado de red por SSID (“redpucp” en nuestro caso); el tiempo de escaneo por cada canal será de 250 milisegundos, periodo por defecto.



**FIGURA 30: SOFTWARE AIRMAGNET SURVEY PROFESSIONAL**  
**FUENTE: [31]**

- Adaptador USB ORINOCO Proxim Orinoco 8494 802.11 a/b/g/n  
Fluke Networks brinda una lista estricta de adaptadores USB compatible con su software; en esta lista, sólo aparecen 3 adaptadores USB que han sido probados de manera

exhaustiva por el equipo de AirMagnet y son recomendados para su uso. Entre estos 3 adaptadores tenemos el USB Proxim Orinoco 8494, también adquirido por DIRINFO.



**FIGURA 31: ADAPTADOR USB ORINOCO PROXIM ORINOCO 8494**  
FUENTE: [32]

Cuenta con las siguientes características:

**TABLA 3: CARACTERÍSTICAS DEL ADAPTADOR USB ORINOCO**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Estándares	a/b/g/n
Banda de frecuencia	5.15 – 5.85 GHz 2.40 – 2.483 GHz
Radio	MIMO 2X2
Antena	Dos 2.4/5GHz IFA 0dBi
Configuraciones de radio	1 x 802.11b/g/n 1 x 802.11a/n
Máxima potencia de transmisión	802.11n: 18dBm 802.11a: 17dBm 802.11bg: 18dBm
Velocidad de datos	802.11a: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps 802.11b: 1, 2, 5.5, 11Mbps 802.11g: 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps 802.11n: 6, 6.5, 13, 13.5, 19.5, 26, 27, 39, 40.5, 53, 54, 58.5, 65, 78, 81, 104, 108, 117, 121.5, 130, 135, 162, 216, 243, 270, 300Mbps

- CISCO Prime Infrastructure

Herramienta desarrollada por Cisco, permite gestionar redes fijas e inalámbricas. Es usada actualmente por DIRINFO para la administración de redes en la PUCP; ofrece, entre otras características, la integración con Airmagnet Survey PRO, lo que permite descargar los planos de los distintos pabellones PUCP en un formato que pueda ser leído por el software de Fluke Networks. Con ayuda de esta herramienta se descargaran los planos de nuestro interés en formato PNG y serán cargados en el programa, para poder realizar la recolección de mediciones.

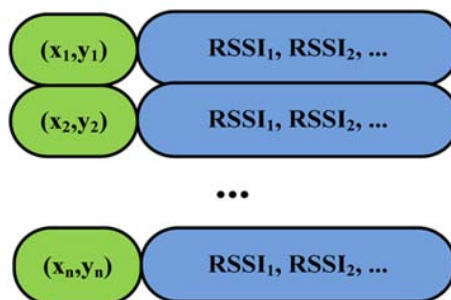


**FIGURA 32: INTERFAZ CISCO PRIME**  
**FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA**

Esta herramienta además permite conocer los nombres de los APs ubicados en el Pabellón H, su potencia de transmisión y su ubicación.

### 3.3.1.2. Generación de base de datos

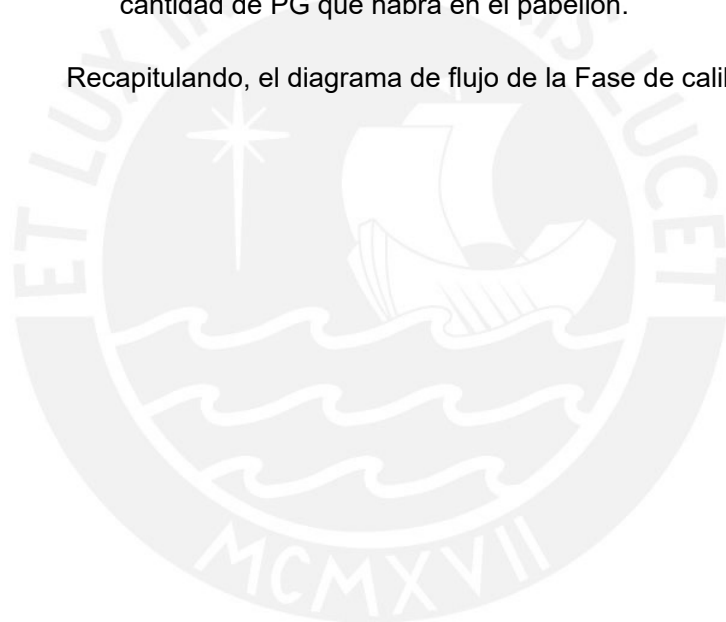
Las mediciones que se realizan serán almacenadas en un vector de dos dimensiones con un formato parecido a:

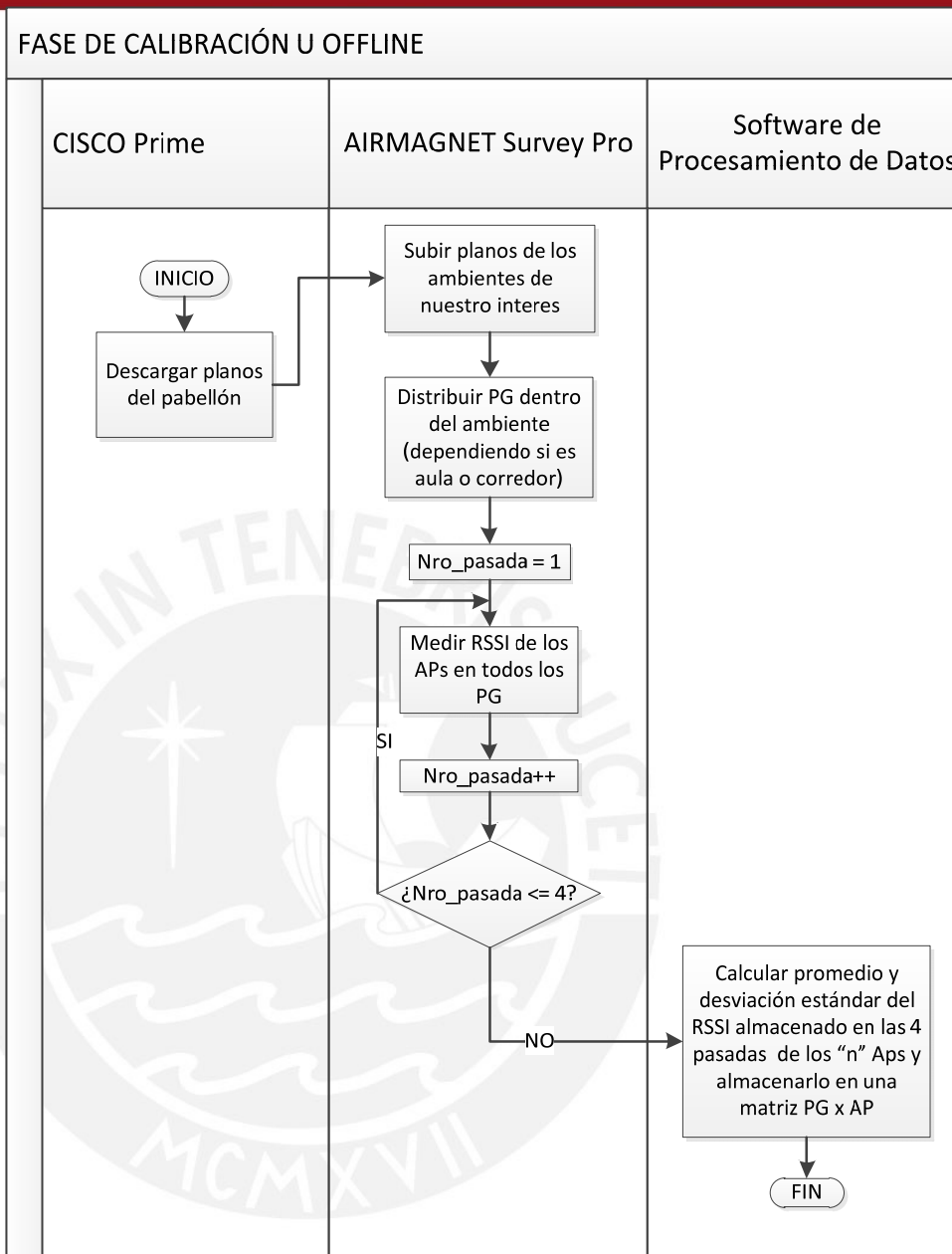


**FIGURA 33: FORMATO VECTOR ALMACENAMIENTO DE MEDICIONES**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Este vector estará constituido por las coordenadas de posicionamiento  $(x, y)$  y las respectivas mediciones RSSI (RSSI<sub>1</sub>, RSSI<sub>2</sub>, ... RSSI<sub>n</sub>) de los “n” APs escaneados por PG; el número de filas del vector será igual a la cantidad de PG que habrá en el pabellón.

Recapitulando, el diagrama de flujo de la Fase de calibración será:





### 3.3.2. Fase de medición en tiempo real u online

En esta fase se localizará al terminal móvil, aprovechando el escaneo online por parte del usuario y la ayuda de una técnica de localización (explicada a detalle en 3.3.2.3) que comparará el escaneo con la base de datos almacenada.

### 3.3.2.1. Escaneo online

El escaneo online será efectuado por parte del usuario a través de su terminal móvil, apoyado de la aplicación android que será desarrollada e implementada en el presente proyecto. Esta aplicación será la encargada de escanear la red WiFi y hallar los datos de interés, tales como el RSSI de la señal (en dBm), el SSID y el MAC de los Access Points que brinden cobertura en ese instante.

Estos datos serán usados por el algoritmo de localización para estimar la posición del usuario basado en las mediciones almacenadas en la base de datos offline.

### 3.3.2.2. Modelo de señal tipo Log-Normal

En la presente sección se quiere demostrar que se puede modelar la señal como una distribución Log-Normal, *lo cual implica que la potencia recibida, expresada en dBm tendría una distribución Normal*. Para eso se recolectó data en el Complejo de Innovación Académica (CIA). En total se realizaron 91 mediciones (en dBm) con un intervalo de tiempo de 2.5 minutos aproximadamente entre cada una de ellas; se realizó con este intervalo de tiempo ya que se busca que las mediciones recolectadas sean independientes entre sí.

De la data recolectada se analizaron las medidas de 2 APs en particular: AP BIB\_P1\_3 y AP BIB\_P1\_4, al ser de doble-banda de frecuencia, tuvimos 4 casos: i) AP BIB\_P1\_3 con LOS (línea de vista) en 2.4 GHz, AP BIB\_P1\_3 con LOS en 5 GHz, iii) AP BIB\_P1\_4 con NLOS (sin línea de vista) en 2,4 GHz y iv) AP BIB\_P1\_4 con NLOS en 5 GHz.

Las 91 mediciones de cada caso fueron almacenadas en 4 vectores en Matlab y se calculó la función de densidad de probabilidad (PDF) para cada uno de los casos.

Para graficar dichas PDF, se utilizó el toolbox de Matlab "Distribution Fitting Tool". Las siguientes figuras muestran gráficamente los PDF de la data, junto a su promedio y su varianza.

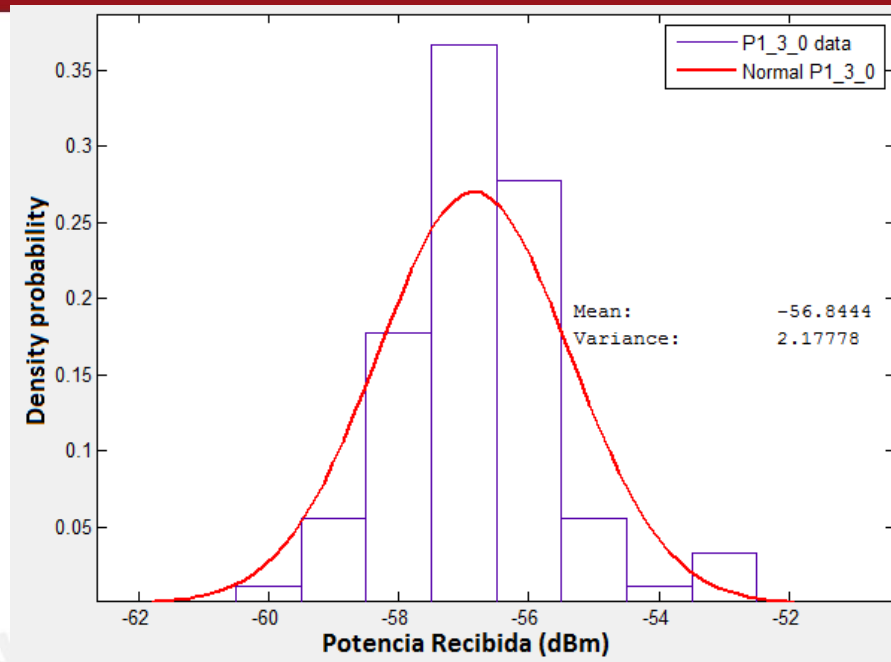


FIGURA 34: PDF CASO i)  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

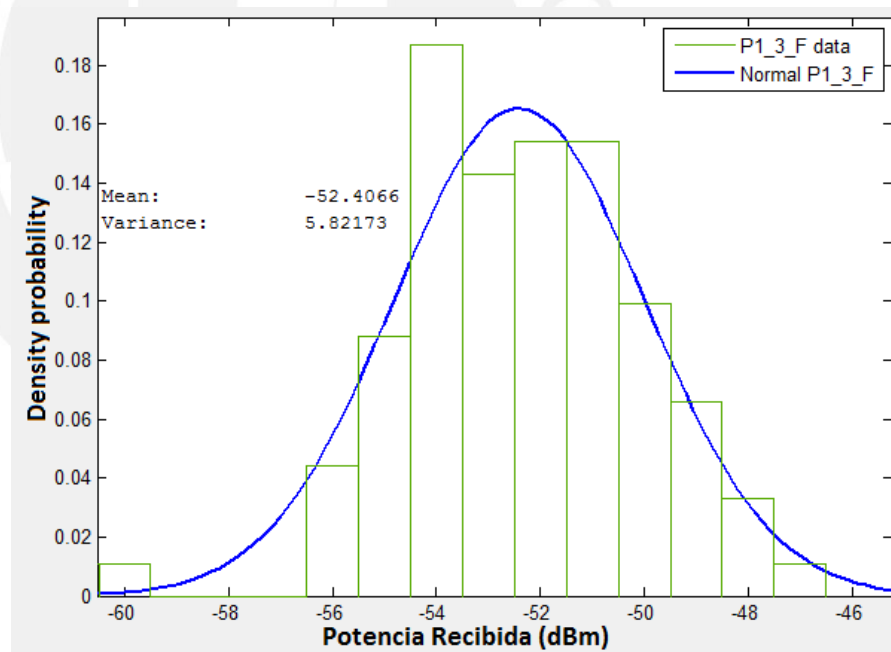


FIGURA 35: PDF CASO ii)  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

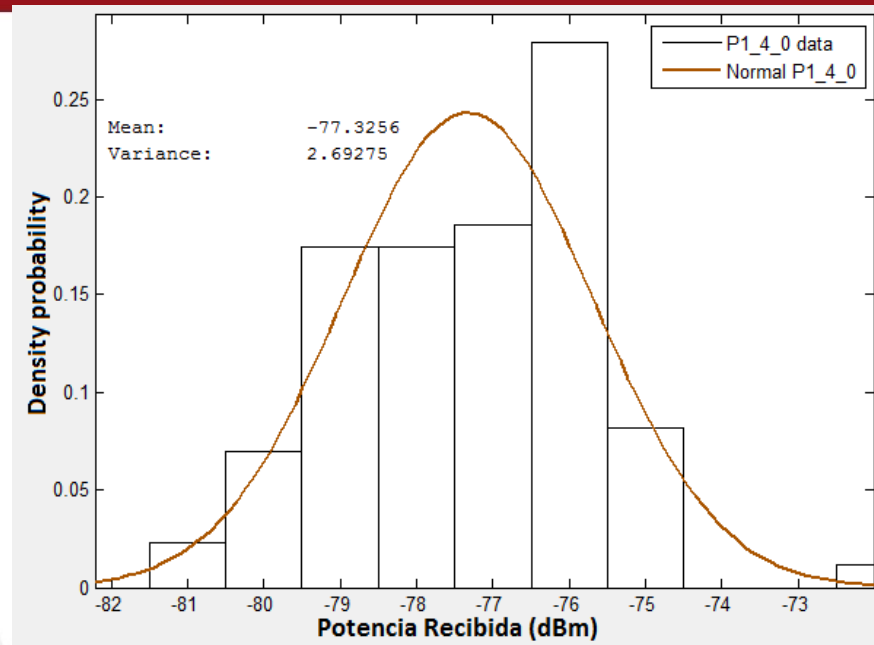


FIGURA 36: PDF CASO iii)  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

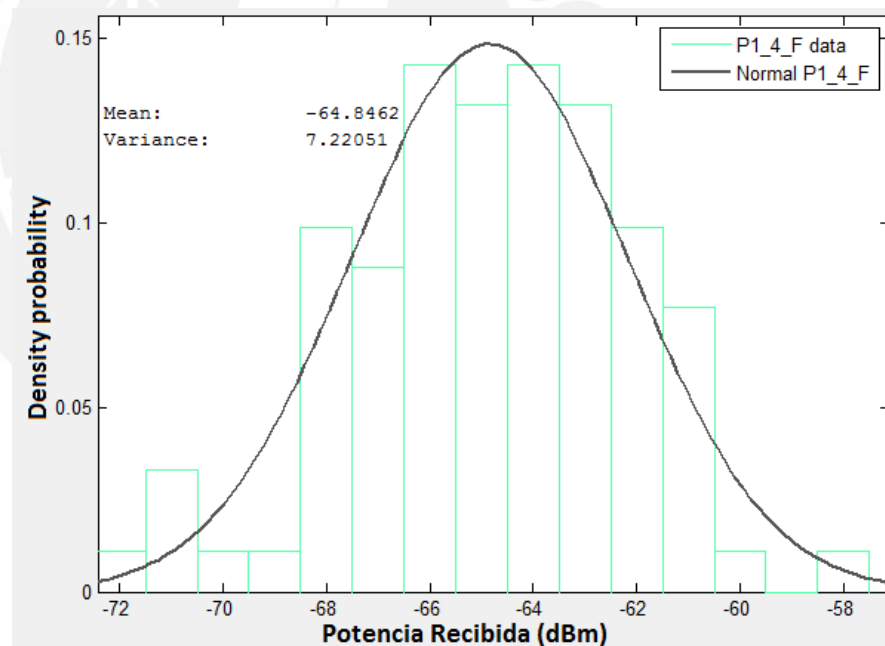


FIGURA 37: PDF CASO iv)  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Se puede observar que todos los casos se asemejan a una función Normal, sin embargo, esto no basta para afirmar que puede ser modelada como tal.

Complementariamente, a través de métricas goodness of fit (GoF), específicamente el test Kolmogorov–Smirnov, se evalúa que tan correcto es modelar la potencia (en dBm) como una función Normal.

Matlab cuenta con la función `kstest`, que compara una distribución de entrada con una distribución normal y da como resultado 0 cuando si puede ser modelada como tal y 1 cuando no es recomendable hacerlo.

A continuación se adjunta el código Matlab que realiza el test, también grafica la Función de distribución acumulutavia (CDF) empírica y la CDF Normal.

```

%Test HS para el caso iii)
mean = -77.3256;
variance = 2.69275; %Informacion de la figura

test1 = P1_4_0;

numSamples = length(test1);
x_values = 0.5 + (min(test1)-1):max(test1);
numValues = length(x_values);
f = zeros(1, numValues);

for i = 1:numValues
    cuenta = length(find(test1 < x_values(i)));
    f(i) = cuenta/numSamples;
end
normalized_x_values = (x_values - mean)/sqrt(variance);
h = kstest(normalized_x_values); %KS test
disp(h); %muestra valor test

F = plot(normalized_x_values, f);

set(F, 'LineWidth', 2);
hold on;

G =
plot(normalized_x_values, normcdf(normalized_x_values, 0, 1), 'r
--');
set(G, 'LineWidth', 2);
legend([F G], ...
    'Empirical CDF', 'Standard Normal CDF', ...
    'Location', 'SE');
  
```

Los resultados fueron los siguientes:

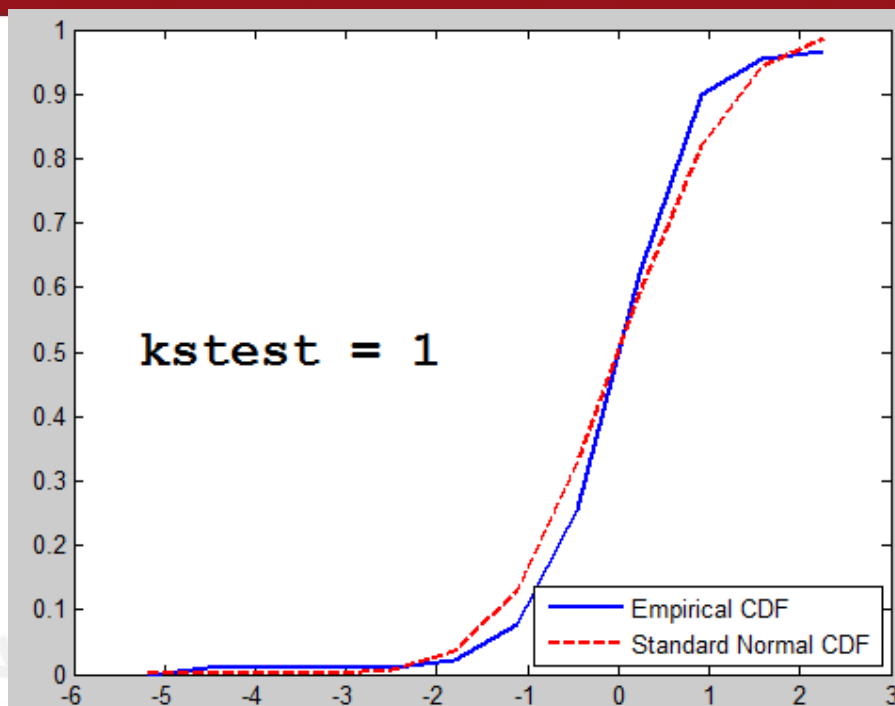


FIGURA 38: RESULTADO TEST K-S CASO i)  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

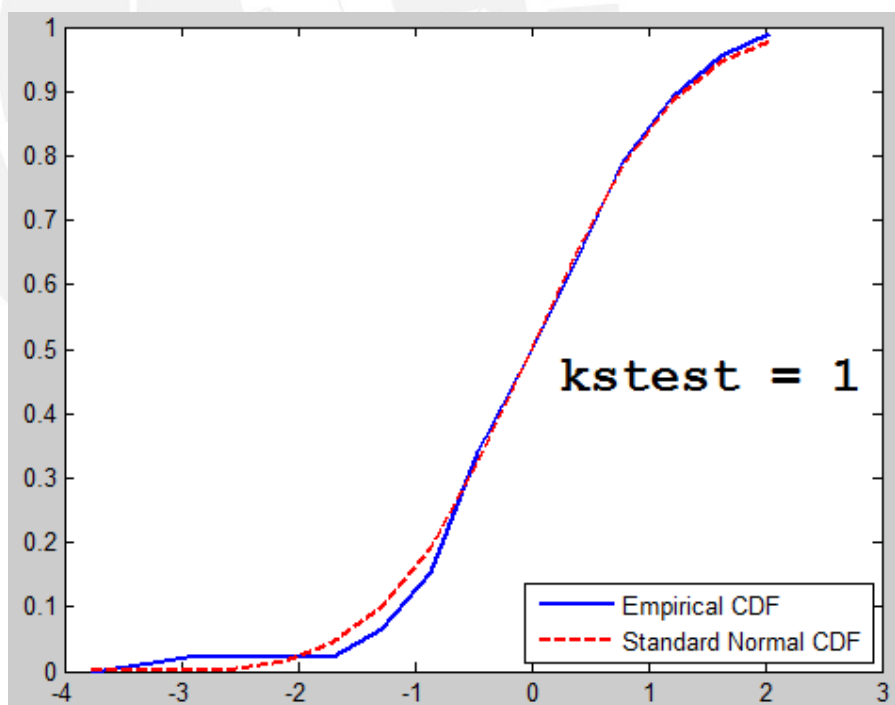


FIGURA 39: RESULTADO TEST K-S CASO ii)  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

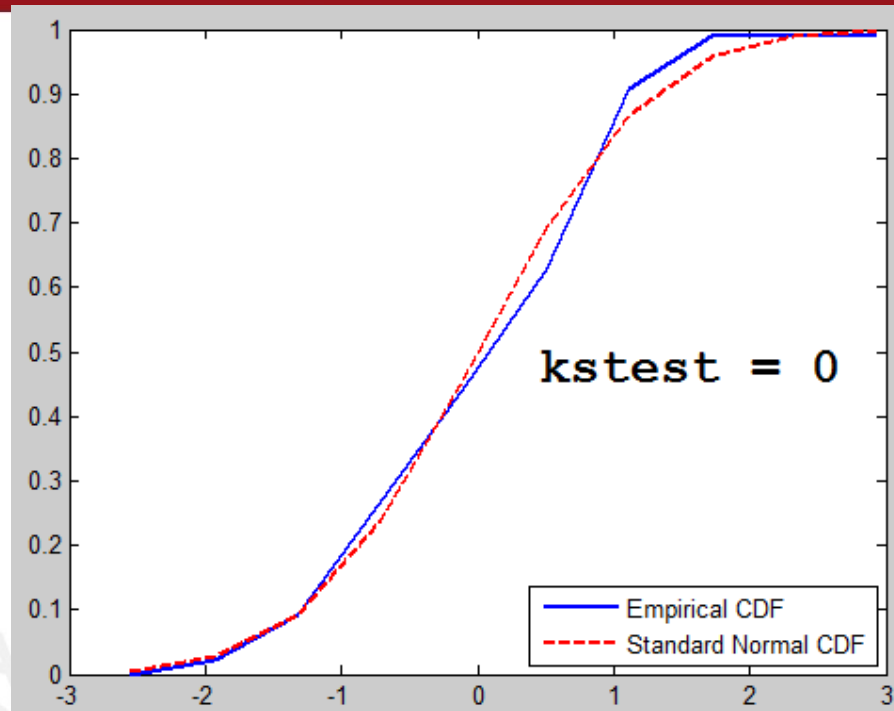


FIGURA 40: RESULTADO TEST K-S CASO iii)  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

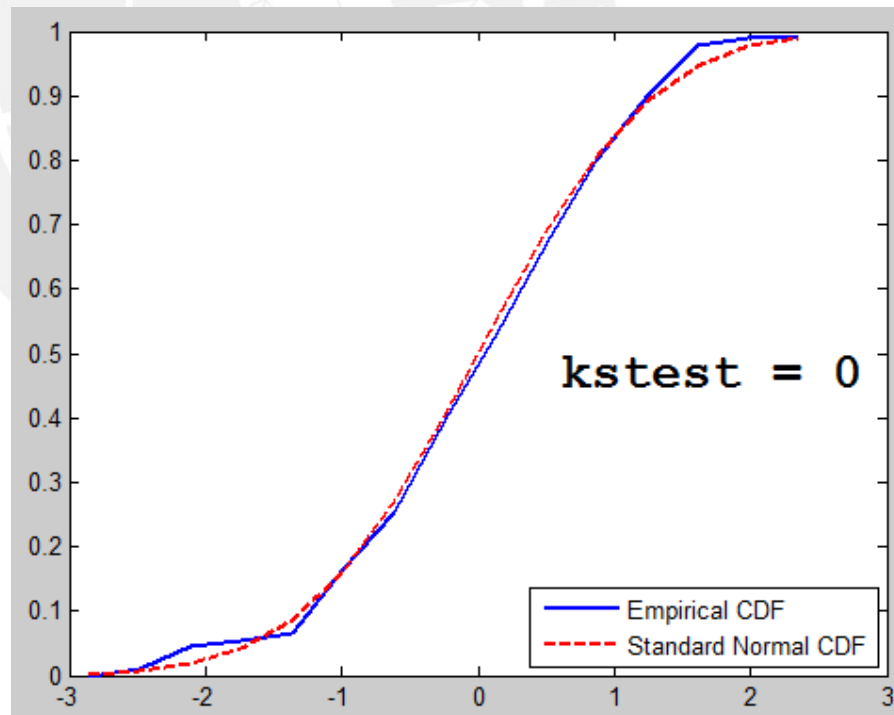


FIGURA 41: RESULTADO TEST K-S CASO iv)  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

Como se observa, para 2 casos (iii y iv) el modelamiento de la potencia como tipo Normal es correcto, para los otros 2 casos no podemos

confirmarlo ni descartarlo; sin embargo, en el capítulo 5 de la tesis de Emerson Acuña y Renato Herrera [29], tesis de Ingeniería de Telecomunicaciones con los que se realizaron en conjunto las mediciones en los cinco pabellones, se analizaron otras métricas GoF y se concluyó que la señal electromagnética de la red WiFi del campus está afectado por desvanecimiento lento, cuya distribución de probabilidad es Log-normal y su potencia puede ser modelada como distribución Normal (en dBm).

### 3.3.2.3. Algoritmo de localización basado en clasificador ML

En la fase de calibración descrita en 3.2.1, el sistema almacenara “ $m$ ” mediciones de los niveles de potencia de “ $n$ ” APs por fingerprinting ( $m = 4$  en nuestro caso). Si se denota la medición “ $j$ ” de un AP “ $i$ ” como  $x_i^j$ , el promedio y la desviación estándar serán calculados por:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_i^j \quad (3.1) \quad s_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (x_i^j - \bar{x}_i)^2} \quad (3.2)$$

El fingerprinting calibrado será  $\mathbf{F} = (\bar{\mathbf{x}}; \mathbf{s})$ , donde  $\bar{\mathbf{x}}$  y  $\mathbf{s}$  son los vectores  $n$ -dimensionales  $(\bar{x}_1; \bar{x}_2; \dots; \bar{x}_n)$  y  $(s_1; s_2; \dots; s_n)$  respectivamente. Este vector  $\mathbf{F}$  es el que será almacenado en la base de datos offline, junto a sus coordenadas de localización.

Durante la fase de medición en tiempo real, el sistema mide el fingerprinting real de una localización desconocida dentro de un ambiente y luego se estima el fingerprinting calibrado que clasifique como el mejor emparejamiento.

La función de densidad de probabilidad de la potencia  $x$  de la señal (en dBm) de una distribución Log-Normal con promedio  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  es:

$$p(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.3)$$

Reemplazando  $\mu$  y  $\sigma$  por sus estimados  $\bar{x}$  y  $s$ :

$$p(x|\bar{x}, s) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{s}\right)^2} \quad (3.4)$$

La función Likelihood en este caso sería igual a:

$$\mathcal{L}(x|\bar{x}, s) = p(x_1|\bar{x}_1, s_1) * p(x_2|\bar{x}_2, s_2) * \dots * p(x_n|\bar{x}_n, s_n) \quad (3.5)$$

$$= \frac{1}{(\prod s_i)(2\pi)^{n/2}} e^{-\frac{1}{2}\sum\left(\frac{\hat{x}_i' - \bar{x}_i}{s_i}\right)^2} \quad (3.6)$$

Hallando  $\Lambda(x|\bar{x}, s) = \log \mathcal{L}(x|\bar{x}, s) =$

$$\Lambda(x|\bar{x}, s) = -\ln(\prod s_i) - \frac{n}{2}\ln 2\pi - \frac{1}{2}\sum\left(\frac{\hat{x}_i' - \bar{x}_i}{s_i}\right)^2 \quad (3.7)$$

Multiplicando esta expresión por -1 e ignorando el segundo término porque es una constante; se obtiene que el estimador ML será el que minimice la siguiente función discriminante:

$$g(\hat{x}') = \ln(\prod s_i) + \frac{1}{2}\sum\left(\frac{\hat{x}_i' - \bar{x}_i}{s_i}\right)^2 \quad (3.8)$$

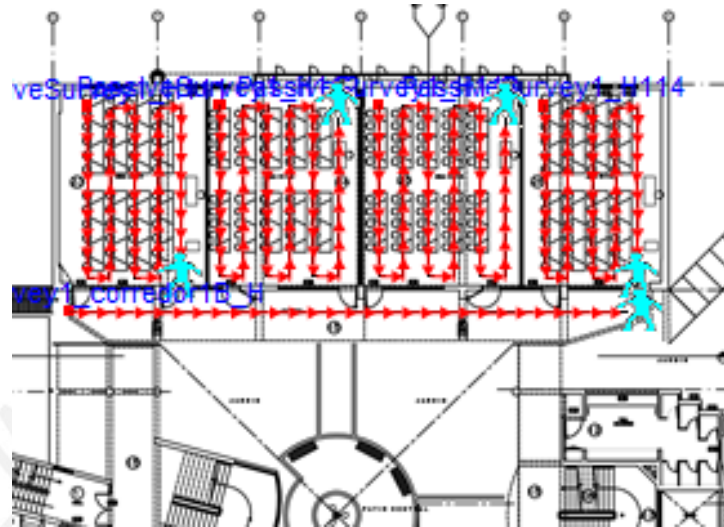
En conclusión, dada la señal WiFi  $\hat{x}'$  medida en una localización desconocida, el fingerprint calibrado  $\mathbf{F} = (\bar{\mathbf{x}}; \mathbf{s})$  que dé como resultado el mínimo valor de la función discriminante  $g(\hat{x}')$  determinará la localización más cercana.

### 3.5. Implementación del sistema de localización

#### 3.5.1. Recolección de muestras y creación base de datos

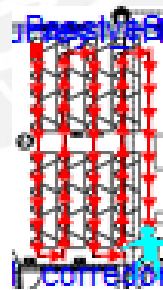
Como se mencionó anteriormente, la recolección de muestras es efectuada por ambiente y en forma conjunta con dos tesis de Ingeniería de Telecomunicaciones [29]. La cantidad de PG en un ambiente varía dependiendo de sus dimensiones y si es un corredor o un aula.

En la siguiente figura se puede observar como fue el proceso de recolección de muestras en un sector (5 ambientes: 4 aulas y 1 corredor) de la primera planta del Pabellón H:



**FIGURA 42: PROCESO RECOLECCION MUESTRAS**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En el ambiente (H111) de la siguiente figura, se aprecia que la recolección inicio en la esquina superior izquierda (cuadrado rojo) y culmino en la esquina inferior derecha (persona celeste), en total se recolectaron 50 fingerprinting (10 columnas x 5 filas), representados por triángulos que adicionalmente indican la dirección en que se tomaron las mediciones.



**FIGURA 43: RECOLECCION DE MUESTRAS EN H11**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En la siguiente tabla se resumen los detalles del Pabellón H.

**TABLA 4: DETALLES DEL PABELLÓN H**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Nro de Plantas	Nro de Ambientes	#PG	#APs
4	38	1887	35



	A	B	C	D	E	G	H	I
1	#salon	#med	#PS	Xpos	Ypos	SSID	AP	SignalDBM
2	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'00:19:A9:FD:E9:E0'	-83
3	H100	1	2	22.638918	52.377237	'redpucp'	'00:19:A9:FD:E9:E0'	-63
4	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'34:A8:4E:6A:1D:3F'	-84
5	H100	1	4	22.638918	52.377237	'redpucp'	'34:A8:4E:6A:1D:3F'	-81
6	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'34:A8:4E:6A:22:FF'	-75
7	H100	1	2	22.638918	52.377237	'redpucp'	'34:A8:4E:6A:22:FF'	-81
8	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:20'	-75
9	H100	1	2	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:20'	-76
10	H100	1	3	22.648853	52.367302	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:20'	-77
11	H100	1	4	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:20'	-75
12	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:2F'	-80
13	H100	1	2	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:2F'	-79
14	H100	1	3	22.648853	52.367302	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:2F'	-81
15	H100	1	4	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:0C:4D:2F'	-78
16	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:00'	-69
17	H100	1	2	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:00'	-62
18	H100	1	3	22.648853	52.367302	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:00'	-68
19	H100	1	4	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:00'	-65
20	H100	1	1	22.648853	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:0F'	-58
21	H100	1	2	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:0F'	-53
22	H100	1	3	22.648853	52.367302	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:0F'	-57
23	H100	1	4	22.638918	52.377237	'redpucp'	'64:12:25:10:C3:0F'	-62

**FIGURA 45: DATA FILTRADA EN EXCEL**  
**FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA**

Se observa que en las columnas D, E, G, H e I están los datos recolectados del SVD, adicionalmente se agregaron las columnas A (nombre del ambiente), B (PG dentro del ambiente) y C (número de recorrido).

Esta data será exportada a Matlab, ya que allí será realizado íntegramente el procesamiento, que incluye la creación de la base de datos y la implementación del algoritmo de localización basado en MLC.

Como se mencionó en la sección 3.2.2.3 la data almacenada en la BD será el fingerprinting con sus respectivos promedios y desviación estándar de las señales RSSI medidas por AP.

Utilizando las funciones “mean” (promedio) y “std” (desviación estándar) de Matlab lograremos armar nuestra BD con la información de los Fingerprinting.

Nuestra base de datos quedara de la siguiente manera:

20x5 cell

	1	2	3	4	5
1	'H100'	'34:A8:4E:6A:1D:3F'	'H100_1'	-82.5000	2.1213
2	'H100'	'34:A8:4E:6A:22:FF'	'H100_1'	-78	4.2426
3	'H100'	'64:12:25:0C:4D:20'	'H100_1'	-75.7500	0.9574
4	'H100'	'64:12:25:0C:4D:2F'	'H100_1'	-79.5000	1.2910
5	'H100'	'64:12:25:10:C3:00'	'H100_1'	-66	3.1623
6	'H100'	'64:12:25:10:C3:0F'	'H100_1'	-57.5000	3.6968
7	'H100'	'64:12:25:15:07:C0'	'H100_1'	-82.2500	0.5000
8	'H100'	'64:12:25:15:07:CF'	'H100_1'	-85	0
9	'H100'	'64:12:25:28:9A:10'	'H100_1'	-74.5000	2.6458
10	'H100'	'64:12:25:28:9A:1F'	'H100_1'	-70.7500	3.5940
11	'H100'	'64:12:25:2C:E5:DF'	'H100_1'	-78	1.4142
12	'H100'	'D0:72:DC:EA:09:4F'	'H100_1'	-80	5.2915
13	'H100'	'00:19:A9:FD:E9:E0'	'H100_2'	-79.5000	3.5355
14	'H100'	'20:3A:07:49:C4:2F'	'H100_2'	-82	0
15	'H100'	'34:A8:4E:6A:1D:30'	'H100_2'	-81	0
16	'H100'	'34:A8:4E:6A:1D:3F'	'H100_2'	-84.5000	2.1213
17	'H100'	'34:A8:4E:6A:22:FF'	'H100_2'	-80.7500	1.7078
18	'H100'	'64:12:25:0C:4D:20'	'H100_2'	-75.5000	1.7321
19	'H100'	'64:12:25:0C:4D:2F'	'H100_2'	-78.2500	1.8930
20	'H100'	'64:12:25:10:C3:00'	'H100_2'	-66.2500	1.7078

FIGURA 46: EJEMPLO FORMATO BASE DE DATOS  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En donde las columnas indican lo siguiente:

1. Nombre del ambiente
2. MAC del AP
3. ID del PG
4. Promedio de las mediciones del AP
5. Desviación de las mediciones del AP

Nota: 4 y 5 forman en conjunto los fingerprints de los PG.

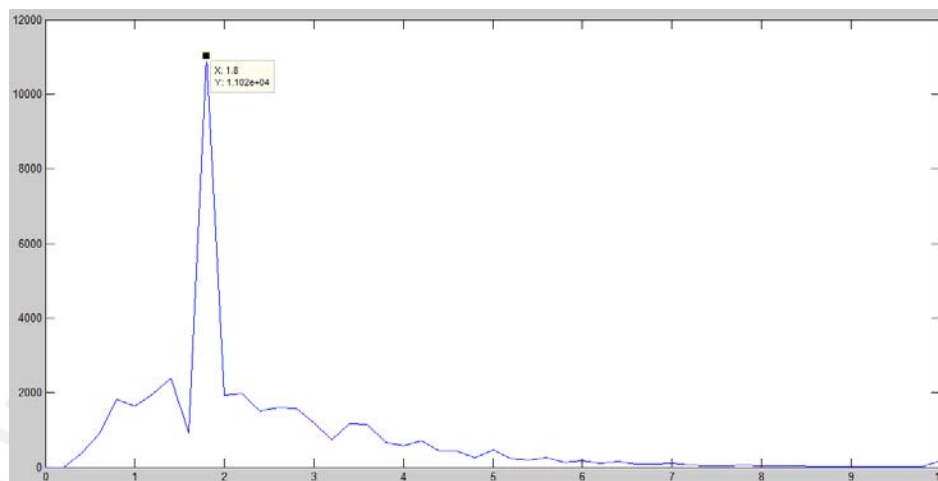
Adicionalmente, se tiene un vector que almacena las Potencias de Transmisión (Tx\_power) de los APs por ambiente.

En la figura también se puede observar que hay tres casos en los que la desviación estándar sale 0. Esto puede suceder, debido al poco número de muestras que tenemos por PG (cuatro).

Debido a que la discriminante con la que hallaremos el MLC (sección 3.2.2.3) tiene como componente una división por la desviación estándar, se tienen que

reemplazar estos 0 por un valor adecuado, para evitar que la discriminante arroje error al momento de hallar el MLC.

Con ayuda de la función “hist” se grafica el histograma de la desviación estándar de todos los fingerprint de los PG para evaluar su comportamiento y elegir el mejor valor que reemplace a los valores nulos.



**FIGURA 47: HISTOGRAMA COMPORTAMIENTO DESV. ESTANDAR EN FPs**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Observando el comportamiento de la desviación estándar hay un pico prominente en 1.8 que es el valor que será asumido como mínima desviación estándar en todos los fingerprints, los valores que son menores a este valor tendrán una aproximación errónea, por lo tanto serán ajustados a este valor.

Para facilitar las operaciones dentro de Matlab, se crea una matriz  $M \times N$ , en donde  $M$  está compuesto por los índices que indican todos los PG (1886 en total) y  $N$  representa los índices de la MAC de los APs que tienen cobertura dentro del Pabellón H (162 en total).

La matriz queda de la siguiente manera:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-73	-82.5000	-78	-75.7500	-79.5000	-66	-57.5000	-82.2500	-85	-74.5000	-70.7500
2	-79.5000	-82	-81	-84.5000	-80.7500	-75.5000	-78.2500	-66.2500	0	-59.3333	-81.5000
3	-80	-81	-81.5000	-79.5000	-75.2500	-77	-64.5000	-59	0	-81	-74.2500
4	-81.3333	-83	-77.7500	-74.2500	-76.7500	-63.7500	-57.5000	-81.2500	0	-72.5000	-70.7500
5	-81	-84	-81.7500	-74.2500	-76.7500	-62.2500	-57.7500	-80.7500	0	-73	-64.7500
6	-82.5000	0	-79	-71.5000	-74.2500	-61.7500	-56.2500	-79.2500	0	-69.5000	-65.5000
7	-80	-84	-84	-77.7500	-73.7500	-75	-63.2500	-54.7500	0	-80	-75.2500
8	-79	-83	-76.3333	-73	-77.5000	-61.7500	-55.5000	-81	-83	-76.7500	-70.7500
9	-77	-83.5000	-81	-73.5000	-77	-61	-58	-81.2500	-83	-78.3333	-73.2500
10	-80	-84	-83	-74.5000	-78.5000	-66.2500	-57	-82.7500	0	-78.5000	-70.7500
11	-81.3333	0	-80.2500	-75.7500	-78.2500	-63	-58.5000	-79	0	-76.7500	-69.7500
12	-79.6667	-84	-81	-76.7500	-77.5000	-64.5000	-58.5000	-80.6667	0	-80.5000	-69.7500
13	-82.5000	-81	-83	-84	-78.5000	-72	-75.7500	-59.5000	0	-59.5000	-77
14	-75.5000	-81	-83	-83.5000	-77.7500	-74.7500	-76	-56.2500	-53.5000	-79.7500	-81
15	-79.3333	-83	-86	-78.7500	-74.5000	-73.5000	-56.7500	-55.7500	-81.2500	-81	-67.7500
16	-78	-83	-78	-75.7500	-73.2500	-53.5000	-51	-76.7500	0	-70	-66
17	-76.7500	-84.5000	-82	-81.3333	-70.5000	-76.2500	-52.5000	-52.7500	-77.5000	-82	-70.5000
18	-78.7500	-83	-82	-82.2500	-75	-77.5000	-58.7500	-57	0	-82.6667	-78.2500
19	-77.6667	-83	-83.5000	-81.6667	-73.7500	-77.2500	-62.3333	-59.5000	0	-82	-78.7500
20	-83.6667	0	-83	-80.7500	-76.2500	-78.7500	-66	-61.5000	0	-83.3333	-79.2500
21	-81.3333	0	-81.7500	-77.2500	-78.7500	-65.5000	-63	-83	0	-81.2500	-73.5000
22	-82.6667	-83	-78.5000	-76	-80	-67.6667	-59	0	0	-80	-71.2500
23	-79.7500	-82	-86	-80.5000	-76	-78.2500	-60	-54.2500	0	-82.7500	-75.5000
24	-79.2500	-85	-77	-86.5000	-80	-75.7500	-75.7500	-54.7500	0	-54.7500	-83
25	-78.5000	-80.2500	-85	-79.5000	-73.7500	-74.7500	-53.5000	-50	0	-79.2500	-72.5000

**FIGURA 48: MATRIZ PG x AP**  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

Las celdas que contienen valor 0 indican que ese PG no tiene cobertura de ese AP.

Adicionalmente se tiene la lista de los PG y APs con su índice.

1886x1 cell

	1
1	H100_1
2	H100_2
3	H100_3
4	H100_4
5	H100_5
6	H100_6
7	H100_7
8	H100_8
9	H100_9
10	H100_10
11	H100_11
12	H100_12
13	H100_13
14	H100_14
15	H100_15
16	H100_16
17	H100_17

**FIGURA 49: VECTOR PG CON INDICES**  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

162x1 cell

	1
1	00:19:A9:FD:E9:E0
2	34:A8:4E:6A:1D:3F
3	34:A8:4E:6A:22:FF
4	64:12:25:0C:4D:20
5	64:12:25:0C:4D:2F
6	64:12:25:10:C3:00
7	64:12:25:10:C3:0F
8	64:12:25:15:07:C0
9	64:12:25:15:07:CF
10	64:12:25:28:9A:10
11	64:12:25:28:9A:1F
12	64:12:25:2C:E5:DF
13	D0:72:DC:EA:09:4F
14	20:3A:07:49:C4:2F
15	34:A8:4E:6A:1D:30
16	D0:72:DC:EA:09:40
17	34:A8:4E:6A:22:F0
18	20:3A:07:49:C4:20

FIGURA 50: VECTOR APs CON INDICES  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

### 3.4.2. Aplicación Android

#### 3.4.2.1. Objetivos

Los objetivos de la aplicación Android son los siguientes:

- Escanear las redes WiFi en un punto determinado.
- Filtrar las redes escaneadas por “redpucp”.
- Cumplir la función de cliente, enviando datos tales como MAC y RSSI del AP escaneado al servidor Matlab.

#### 3.4.2.2. Escaneo y filtrado de WiFis

El escenario que se propone para la geolocalización está basado en que un usuario, ubicado en un punto dentro de alguno de los 38 ambientes del pabellón H que son parte del alcance del presente proyecto, esté conectado a la red WiFi de la PUCP a través de su dispositivo móvil Android.

Para el desarrollo de la aplicación se utilizará el sistema operativo Android 4.4.2 (lanzada en diciembre del 2013) y las pruebas serán realizadas en un dispositivo móvil SAMSUNG Galaxy Note 3, ya que es el terminal móvil

que se dispone y su uso no acarrearía gastos adicionales para la realización del presente proyecto. La programación será realizada íntegramente en Android Studio, la IDE más recomendable por ser la IDE oficial de Google.

Nuestra aplicación de escaneo de redes contendrá un Botón “SCAN” y un TextView rotulado con “Resultados:” en donde se mostrarán los datos de las redes WiFi escaneadas.



**FIGURA 51: INTERFAZ DE LA APLICACIÓN DE ESCANEO DE REDES**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



**FIGURA 52: RESULTADOS DEL ESCANEADO DE RED**  
**FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA**

Como se puede apreciar, al presionar el botón SCAN, la aplicación muestra todos los datos que se puede sacar de la clase ScanResult, una clase que nos aporta los resultados de escaneo que ha realizado la clase WifiManager sobre todos los APs que brindan cobertura WiFi.

Se muestran datos tales como:

- SSID: Identificador único de red.
- BSSID: MAC de la red.
- Capabilities: Describe el método de autenticación, administración de clave y tipo de encriptación.
- Level: RSSI de la señal (en dBm), entre otros.

Los valores que importan son SSID, BSSID y Level. Con el SSID podremos filtrar “redpucp” que es la red de la PUCP y sobre la que se trabajará. Adicionalmente, para el posterior envío de datos al servidor Matlab, se tienen que poner los datos escaneados en un formato amigable para Matlab.

Lo anteriormente mencionado se logra con el siguiente código JavaScript (lenguaje usado en Android Studio):

```

List<ScanResult> wifiScanList = wifi.getScanResults();
//escaneo redes
wifis = new String[wifiScanList.size()];
for (int i = 0; i < wifiScanList.size(); i++) {
//filtrare por 'redpucp'
    if
((wifiScanList.get(i).SSID).toString().compareTo("redpucp")
== 0) {
//Mostrare SSID, MAC y RSSI
        wifis[10] = ((wifiScanList.get(i).SSID).toString()
+ ";" +
(wifiScanList.get(i).BSSID).toString().toUpperCase() + ";"
+ (wifiScanList.get(i).level));
    }
    else wifis[10] = "["; //si no, coloca un espacio vacio
}
tv1.setText(Arrays.toString(wifis).replaceAll("\\[|\\]|\\,",
",")); //elimino los corchetes o comas

```

Con la modificación realizada, al dar clic en el botón "SCAN", la aplicación mostrará la siguiente cadena de texto en el TextView:



**FIGURA 53: RESULTADOS FILTRADOS DEL ESCANEADO DE RED**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La figura muestra una cadena de texto con el siguiente formato: "SSID<sub>1</sub>;MAC<sub>1</sub>;RSSI<sub>1</sub> SSID<sub>2</sub>;MAC<sub>2</sub>;RSSI<sub>2</sub> ... SSID<sub>n</sub>;MAC<sub>n</sub>;RSSI<sub>n</sub>", se muestran los datos de interés de "n" redes escaneadas y cada una aparece separada por un espacio. Para el ejemplo se muestran solo 2 redes escaneadas:

"redpucp;E8:DE:27:3C:86:00;-60 redpucp;E8:DE:27:3C:85:C9:-92"

Este formato será fácilmente leído y procesado por Matlab para estimar la localización del dispositivo móvil.

#### 3.4.2.3. Envío y recepción de datos con el servidor

Una vez se ha generado la cadena de texto con los datos de medición online por parte del usuario, se deben enviar a Matlab, para que éste los procese.

El envío de datos será a través de comunicación socket, para ello se usa la clase Socket, que provee un cliente TCP socket. La forma de configurarlo en Android es la siguiente:

```
private Socket socket;

private static final int SERVERPORT = 30000; //Puerto
private static final String SERVER_IP = "10.100.69.66";
//IP del servidor Matlab

try {
    String str = tv1.getText().toString();
    PrintWriter out = new PrintWriter(new BufferedWriter(
        new
        OutputStreamWriter(socket.getOutputStream())),
        true); //Envio la trama via socket al server
    out.println(str);
    @Override
    public void run() {
        try {
            InetAddress serverAddr =
            InetAddress.getByName(SERVER_IP);

            socket = new Socket(serverAddr, SERVERPORT);

        } catch (UnknownHostException e1) {
            e1.printStackTrace();
        } catch (IOException e1) {
            e1.printStackTrace();
        }
    }
}
```

### 3.4.3. Aplicación Matlab

#### 3.4.3.1. Objetivos

Los objetivos de la aplicación en Matlab son los siguientes:

- Cumplir la función de un servidor, enviando y recibiendo datos del dispositivo android que hará la función de cliente.

- Implementar el algoritmo de localización en el Pabellón H.

#### 3.4.3.2.Recepción de datos del cliente

Se realizará a través de un TCPIP server socket configurado en Matlab, lo que permitirá el intercambio de datos de manera confiable y ordenada.

Para usar esta característica es necesario configurar la propiedad NetworkRole en la interfaz tcpip; esta propiedad usa dos valores: cliente y servidor, para establecer conexión como cliente o servidor (que es nuestro caso) y soporta transferencias de datos binarios o ASCII.

La sintaxis y el código base que se ejecuta en Matlab es el siguiente:

```
%Configuración del TCP/IP Server Socket

%Configurado para aceptar conexiones en el puerto 30000.
t = tcpip('0.0.0.0', 30000, 'NetworkRole', 'server');

%Abre una conexión
fopen(t);

data=strcat(fread(t, 1, 'uint8')); %Leo dato recibido

if get(t, 'BytesAvailable') > 1
    data=strcat(data,fread(t, t.BytesAvailable, 'uint8'));
end

disp(data); %Muestra dato recibido

fclose(t); %Cierra la conexión
```

La cadena de texto recibida del dispositivo android será almacenada en la variable data (de tipo string); como se mencionó en la sección anterior, esta viene dada por una cadena de caracteres que tiene que ser leída e interpretada por Matlab, para luego ser almacenada en un arreglo de MAC y RSSI.

El código que realiza lo explicado es el siguiente:

```

##### Lee los datos enviados por el celular android a
traves del socket
##### y almacena cada linea en un cell array cad_leida

clearvars pos_red pos_men num_red cad_leida
pos_red = strfind(data,'redpucp'); %Halla pos de 'redpucp'

num_red = length(pos_red);
cad_leida = cell(num_red,1);

for i=1 : num_red - 1
    cad_leida(i) = cellstr(data(pos_red(i):pos_red(i+1)-2));
% elimina el espacio en blanco y la 'r' inicial de la
siguiente medicion
end

cad_leida(num_red) = cellstr(data(pos_red(end):end));

%lee cad_leida y genera arreglos MAC_P y X_P
clearvars FP_MED cadena pos_pc

FP_MED = zeros(length(cad_leida),2);
for i = 1 : length(cad_leida)
    cadena = char(cad_leida(i)); %linea i de cad_leida
    pos_pc = strfind(cadena,',''); %"," es mi separador
    i2 = cellstr(cadena(pos_pc(1)+1:pos_pc(2)-1)); %i2
almacenada MAC
    FP_MED(i,1) = str2double(cadena(pos_pc(2)+1:end));
%guardo potencia
    [nn FP_MED(i,2)] = ismember(i2, pr18); %guardo indice
de i2 (MAC)
end
%ordeno FP_MED de mayor a menor (potencia)
FP_MED = sortrows(FP_MED,-1);
  
```

Con lo cual se genera el arreglo FP\_MED que almacena el AP y el RSSI de las señales APs medidas por el usuario.

#### 3.4.3.3. Implementación del algoritmo de localización

Se mencionó que el usuario usará la aplicación móvil para escanear la señal inalámbrica de los APs que brinden cobertura en la posición en la que se ubica y enviará los datos al servidor Matlab, que los procesará y devolverá el ambiente en el que se encuentra el usuario.

El algoritmo realizado en Matlab consta de las siguientes etapas:

##### 3.4.3.3.1. Aplicación de correcciones (offset)

Se analizan dos fuentes de offset:

- a) Ganancia de la antena del Proxim Orinoco y del terminal móvil:  
Como se mencionó en sus especificaciones, la antena del USB

Proxim tiene una ganancia de 0 dBi. La ganancia de la antena del Samsung Galaxy Note 3, que se usa para las pruebas de la aplicación tiene una ganancia de -8.34 dBm (respecto al USB Proxim Orinoco).

- b) Tx Power del AP: Podría variar por alguna manipulación en el controlador.

Hay que tener en cuenta estas fuentes de offset, ya que cualquier variación en ellas acarrearía errores en la estimación de la posición. Lo mejor es calibrar inicialmente estos valores, la ganancia de la antena WiFi del dispositivo móvil se ajusta dentro del código en Matlab. En caso haya una modificación en la potencia de transmisión de los APs, este dato podría ser actualizado de dos maneras: manualmente por un operador dentro del código Matlab (en una variable `current_TxPower` por ejemplo) y la otra opción (más eficiente) sería la creación de una interfaz dentro de Matlab que se “comunique” con el Cisco Prime y reciba mensajes informando cualquier modificación de la potencia de transmisión de algún AP en el controlador; por el momento, esta información se ajusta manualmente dentro del código en Matlab.

#### 3.4.3.3.2. Elección ambientes pre-candidatos

El Estimador ML requiere en primer lugar definir un set de APs adecuado, que cubran todos los PG de las áreas candidatas.

Debido a las dimensiones del Pabellón H, no es posible que todos los PG de los 38 ambientes sean cubiertos por el mismo número de APs; por lo tanto se tiene que hallar primero áreas pre-candidatas, para luego determinar, con ayuda del estimador ML las áreas candidatas.

Para la elección de ambientes pre-candidatos, se tienen como input los 3 APs con mayor potencia de la medición realizada por el usuario a través de la aplicación android; quiere decir que crearemos un vector que contendrá los MAC y las potencias (en dBm) de los 3 APs que emiten más potencia al momento que el usuario escanea la señal WiFi.

Se toman los 3 APs con mayor potencia pues se presupone que todo fingerprinting estará cubierto por al menos 3 APs. Este primer input ayudará a pre-seleccionar los ambientes, con lo cual se disminuirá el

costo computacional y se optimizará el programa, en vez de comparar los datos medidos con los 1886 PG calibrados  $F = (\bar{x}; s)$ .

El código usado en Matlab para realizar el filtrado de los 3 APs con mayor potencia y seleccionar los ambientes pre-candidatos que serán los que estén cubiertos en su totalidad (todos PG) por esos 3 APs es el siguiente:

```

%%HALLO LOS AMBIENTES PRE-CANDIDATOS

clearvars a b aul_pre_cand2

aul_pre_cand2 = zeros(length(pr5), 1);
N = 3; %Numero de APs que se tomaran en cuenta para
hallar pre-candidatos
i2 = 0;
for i = 1 : length(pr5) %cantidad de SALONES
    if i < length(pr5)
        tam = pr5(i+1)-1;
    else
        tam = length(FP_AP_PROM(:,1));
    end
    a = FP_AP_PROM(pr5(i):tam,FP_MED(1:N,2));
    b = max(max(a));
    if b<0 %no hay ninguna entrada 0 que significa
punto no cubierto => APs cubren todos los puntos en el
salon
        i2 = i2+1;
        aul_pre_cand2(i2) = i;
    end
end
aul_pre_cand2 = aul_pre_cand2(1:i2);

```

En `aul_pre_cand2` se almacenan los índices de los ambientes pre-candidatos.

#### 3.4.3.3.3. Elección ambientes candidatos

Lo que se realizará ahora será hallar, en base a esos 3 APs, el MLC de los ambientes pre-candidatos, se compararán y se elegirán a los ambientes candidatos. Es decir, se usarán fingerprints de dimensión 3 (por los 3 APs).

Se considera como ambiente candidato todo aquel ambiente en el que, al menos un punto tenga un valor MLC menor a un umbral (T). En este caso y basado en el error mínimo para maximizar nuestra función

discriminante  $g(\hat{x}')$ , se establece en 3 veces el mínimo valor MLC de los PG de los salones pre-candidatos.

El código en matlab es:

```
%HALLO Y MUESTRO LOS MLC DE PRE-CANDIDATOS
clearvars MLC_pre
N = 3;
UMBRAL = 3;
fprintf('MLC de Salon(es) pre-candidato(s):\n');
X1 = FP_MED(1:N,1);
pre_cand_MLC = zeros(length(aul_pre_cand2),1);
for i = 1:length(aul_pre_cand2)
    tam = pr20(aul_pre_cand2(i));
    X =
FP_AP_PROM(pr5(aul_pre_cand2(i)):pr5(aul_pre_cand2(i)
)+tam-1,FP_MED(1:N,2));
    S =
FP_AP_DESV(pr5(aul_pre_cand2(i)):pr5(aul_pre_cand2(i)
)+tam-1,FP_MED(1:N,2));

    MLC_pre = log(prod(S,2)) + 0.5* sum( ( (
kron(X1',ones(tam,1)) - X ) ./ S ) .^ 2, 2);
    [A,B] = min(MLC_pre);

    disp(['Salon ' pr1(aul_pre_cand2(i)) ' tiene MLC
= ' num2str(A) ]);
    pre_cand_MLC(i)=A;
end
%SELECCIONO AMBIENTES CANDIDATOS
T = UMBRAL * min(pre_cand_MLC); %umbral de descarte
aul_cand2 = aul_pre_cand2(pre_cand_MLC < T);
fprintf('Aula(s) candidato(s):\n');
disp(pr1(aul_cand2));
```

Con lo cual, las aulas candidatos son mostradas en pantalla y almacenadas; sus índices también son almacenados en el vector `aul_cand2`.

#### 3.4.3.3.4. Estimación de la posición

Una vez se hallaron los ambientes candidatos. Se procederá a hallar el MLC, usando el máximo set de APs posible, es decir todos aquellos APs que cubran completamente los ambientes candidatos y que hayan sido medidos por el usuario. La dimensión de los fingerprint usados es generalmente mucho mayor a 3. El PG con el mínimo valor MLC será el que represente mejor la ubicación del usuario.

El código es el siguiente:

```

%%HALLO MLC DE SALONES CANDIDATOS, SOLO DE LOS QUE SE
REPITEN

clearvars X S Xl Xz Sz Xlz

tt1 = FP_MED(:,2); % Set de APs, los APs q se midieron

ptos_a_cubrir = 1461:1640; %FIX ME!!! de la forma
tt=[1:3 11:13 21:23]

tt2=FP_AP_PROM(ptos_a_cubrir, tt1);

AP_SET = tt1(max(tt2,[],1) < 0);

[tt2, AP_index] = ismember(AP_SET, FP_MED(:,2));
Xl = FP_MED(AP_index, 1);

for i = 1:length(aul_cand2)
    tam = pr20(aul_cand2(i));
    %MLC_cand = zeros(tam,1);

    X =
    FP_AP_PROM(pr5(aul_cand2(i)):pr5(aul_cand2(i))+tam-
    1,AP_SET);
    S =
    FP_AP_DESV(pr5(aul_cand2(i)):pr5(aul_cand2(i))+tam-
    1,AP_SET);

    MLC_cand = log(prod(S,2)) + 0.5* sum( ( (
    kron(Xl',ones(tam,1)) - X ) ./ S ) .^ 2, 2);
    [A,B] = min(MLC_cand);

    disp(['Aula ' pr1(aul_cand2(i)) ' punto '
    num2str(B) ' tiene menos MLC = ' num2str(A)]);
end
  
```

Se mostraran en pantalla los menores valores de MLC de cada salón, el menor valor indicará la posición del usuario.

Realizando una prueba, la respuesta en Matlab es:

```
>> Leer_Datos_Android_v2
MLC de Salon(es) pre-candidato(s):
'Salon ' 'H401' ' tiene MLC = ' '8.5513'

'Salon ' 'H402' ' tiene MLC = ' '2.5968'

'Salon ' 'H403' ' tiene MLC = ' '7.7345'

'Salon ' 'H404' ' tiene MLC = ' '37.5037'

Aula(s) candidato(s):
'H402'
'H403'

'Aula ' 'H402' ' punto ' '46' ' tiene menos MLC = ' '27.7311'
'Aula ' 'H403' ' punto ' '50' ' tiene menos MLC = ' '32.1702'
```

Como se observa, la lista de ambientes pre-candidatos muestra los ambientes H401, H402, H403 y H404 y sus MLC mínimos por PG. Los ambientes H401 y H402 quedan descartados como aula candidatos por tener un valor MLC mayor que el umbral ( $T = 2.5968 * 3$ ). En la lista de Aulas candidatos, observamos que de los 2 ambientes, el elegido será el H402, ya que cuenta con el menor MLC (27.7311) y el PG es H402\_46.

En el dispositivo android se mostrará la planta donde está el usuario y el PG dentro del ambiente con un PIN rojo. Como en la siguiente figura:



FIGURA 54: INTERFAZ APLICACIÓN ANDROID  
FUENTE: ELABORACION PROPIA

## CAPÍTULO 4: Ensayos y resultados del sistema implementado

### 4.1. Pruebas de funcionamiento

Se realizaron pruebas dentro de un ambiente del pabellón H, con el terminal móvil SAMSUNG Galaxy Note 3, que como se mencionó anteriormente cuenta con una ganancia de recepción de la antena de  $-8.34$  dBm (respecto al USB Proxim Orinoco).

- Ambiente: H404
- PG medido: 35 (aprox.)

En total se realizaron 40 mediciones en diferentes orientaciones dentro del aula ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ ) relativo al terminal móvil, el tiempo de procesamiento por medición es de 2 segundos aproximadamente. La siguiente figura ilustra mejor la idea. Notar que el AP del ambiente está ubicado al medio del salón.

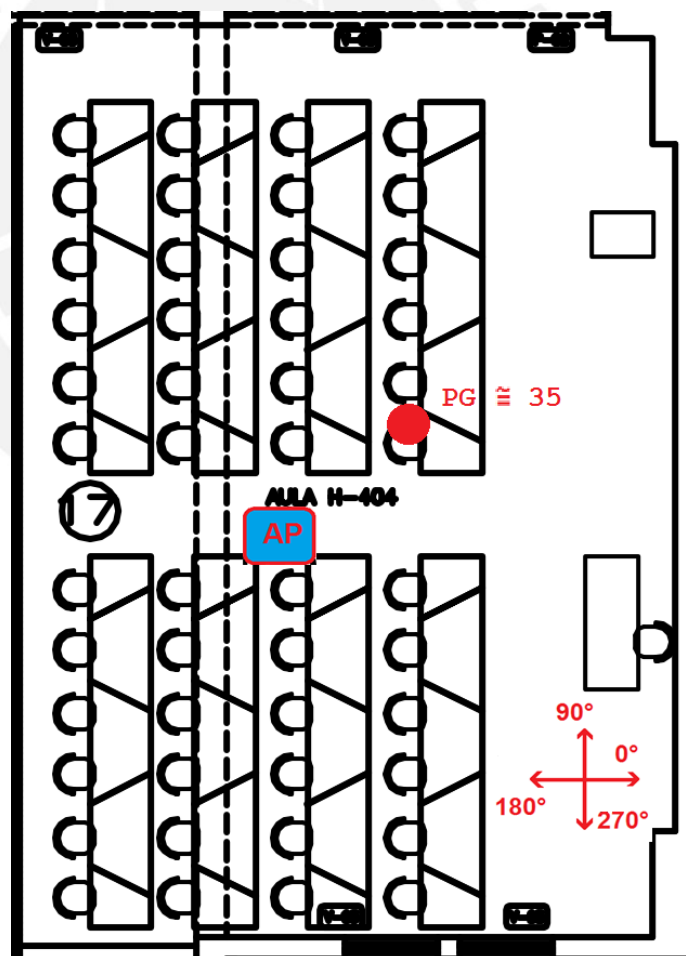


FIGURA 55: DETALLES MEDICIÓN AULA H-402  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El número de mediciones se dividió de la siguiente manera:

**TABLA 5: NÚMERO DE MEDICIONES EN AULA H-402**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Orientación	Tipo vista al AP_404	#Mediciones
0°	NLOS	10
90°	LOS	10
180°	LOS	10
270°	LOS	10
<b>Total</b>		40

Los resultados del algoritmo de localización se resumen en la siguiente tabla:

**TABLA 6: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 0°**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_53	3.30
2	404	H404_31	4.00
3	404	H404_48	2.35
4	404	H404_52	3.98
5	404	H404_31	4.00
6	404	H404_32	3.01
7	404	H404_52	3.98
8	404	H404_52	3.98
9	404	H404_52	3.98
10	404	H404_51	4.77
<b>PROMEDIO ERROR</b>			3.74

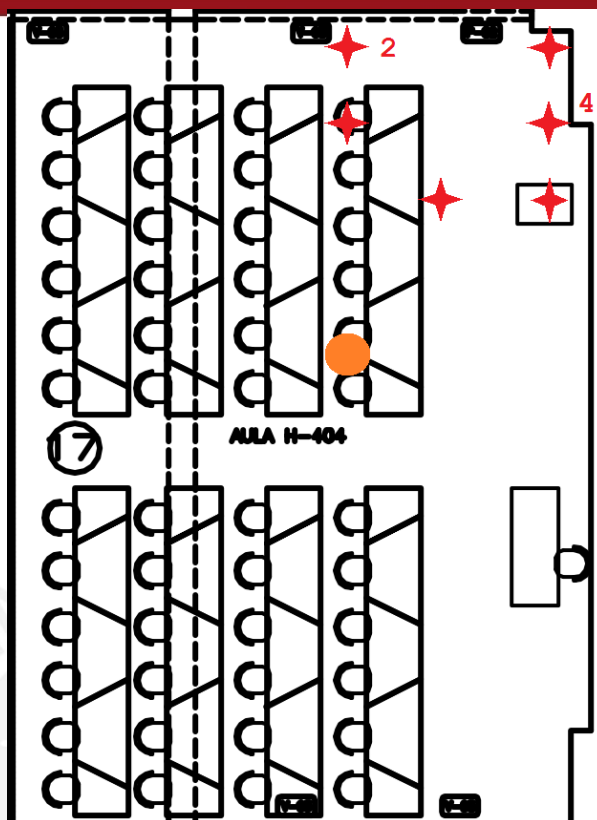


FIGURA 56: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 1.8, 0°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

1 TABLA 7: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 90°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_50	4.17
2	404	H404_50	4.17
3	404	H404_52	3.98
4	404	H404_52	3.98
5	404	H404_52	3.98
6	404	H404_52	3.98
7	404	H404_52	3.98
8	404	H404_52	3.98
9	404	H404_52	3.98
10	404	H404_52	3.98
PROMEDIO ERROR			4.02

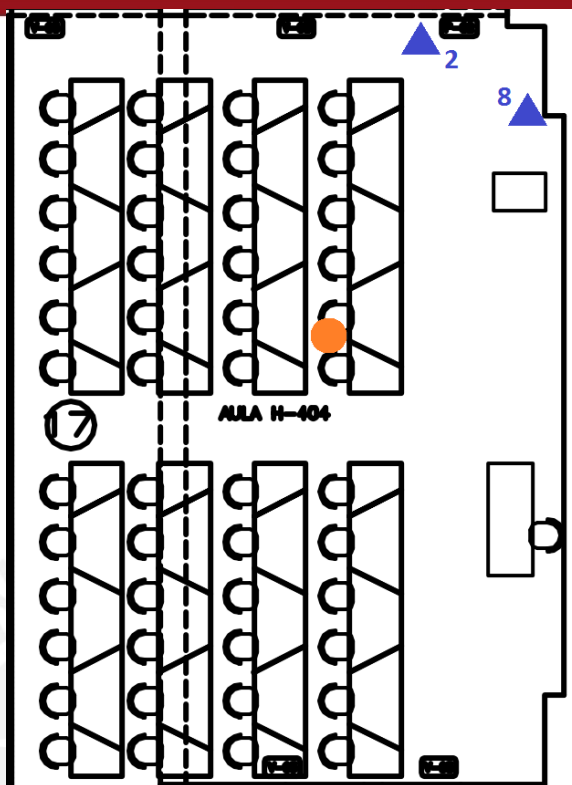


FIGURA 57: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 1.8, 90°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 8: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 180°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_30	4.17
2	404	H404_30	4.17
3	404	H404_30	4.17
4	404	H404_30	4.17
5	404	H404_30	4.17
6	404	H404_52	3.98
7	402	H404_52	3.98
8	404	H404_32	3.01
9	404	H404_30	4.17
10	404	H404_31	4.00
<b>PROMEDIO ERROR</b>			<b>4.00</b>

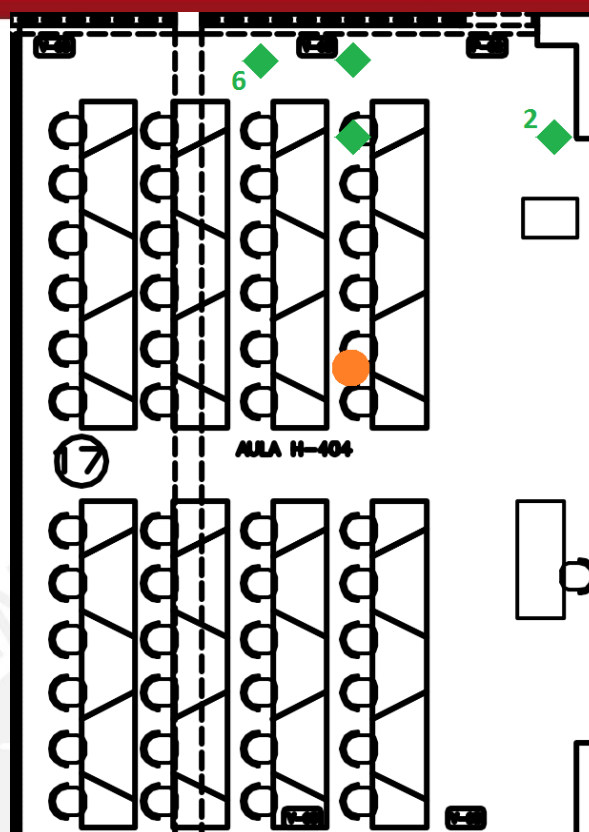


FIGURA 58: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV. EST 1.8, 180°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 9: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 270°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_52	3.98
2	404	H404_31	4.00
3	404	H404_52	3.98
4	404	H404_32	3.01
5	404	H404_50	4.17
6	404	H404_31	4.00
7	404	H404_31	4.00
8	404	H404_42	4.17
9	404	H404_31	4.00
10	404	H404_31	4.00
<b>PROMEDIO ERROR</b>			<b>3.93</b>

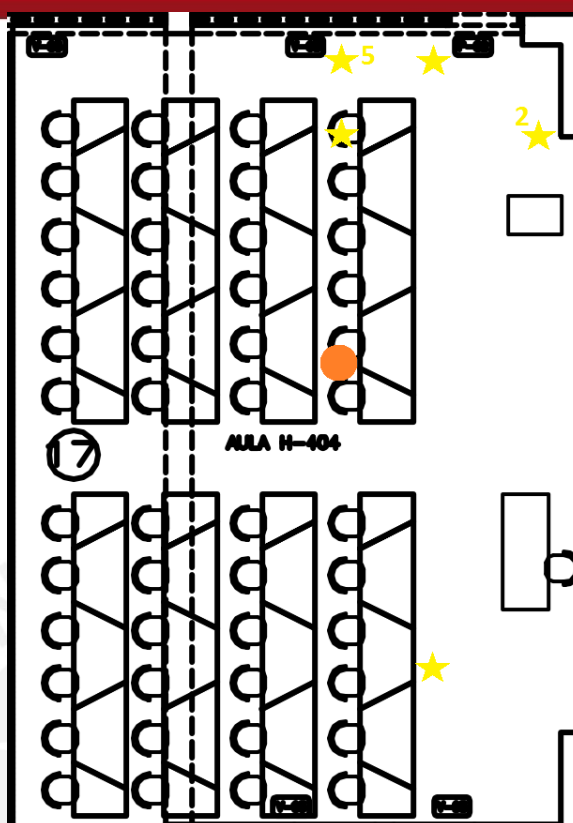


FIGURA 59: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV. EST 1.8, 270°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede apreciar en las tablas y en las gráficas, la orientación del usuario respecto al móvil tiene impacto sobre el error, que aumenta conforme se va perdiendo la línea de vista del AP principal y se va entrando en el rango de línea de vista de los APs de ambientes contiguos (H402 y H403); llegando a un error mayor a 4 m en 2 ángulos (90° y 180°).

También se aprecia que de las 40 estimaciones que se realizaron, todas dieron como ubicación el ambiente correcto (aula 404), por lo que se tiene un acierto en el ambiente del 100%.

Debido al poco número de muestras que se tiene ( $n = 4$ ), se realizará también la estimación asumiendo la desviación estándar de todos los fingerprint = 1 (varianza también 1), esto para no introducir error en nuestro método de localización.

Los resultados del algoritmo de localización asumiendo la desviación estándar igual a uno, se resumen en las siguientes tablas:

TABLA 10: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 0°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_52	3.98
2	404	H404_31	4.00
3	404	H404_52	3.98
4	404	H404_52	3.98
5	404	H404_52	3.98
6	404	H404_32	3.01
7	404	H404_51	4.77
8	404	H404_52	3.98
9	404	H404_52	3.98
10	404	H404_51	4.77
PROMEDIO ERROR			4.04

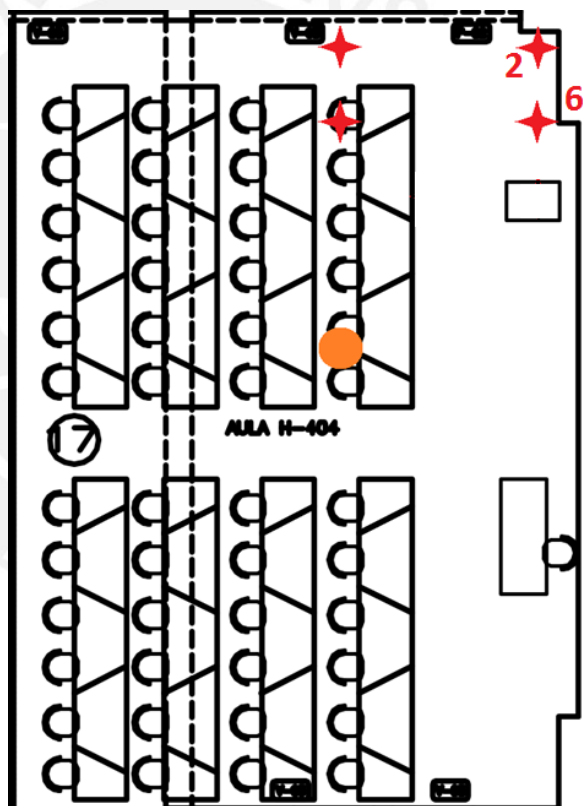


FIGURA 60: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV. EST 0, 0°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 11: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 90°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_52	3.98
2	404	H404_52	3.98
3	404	H404_52	3.98
4	404	H404_52	3.98
5	404	H404_50	4.17
6	404	H404_52	3.98
7	404	H404_52	3.98
8	404	H404_52	3.98
9	404	H404_52	3.98
10	404	H404_52	3.98
PROMEDIO ERROR			4.00

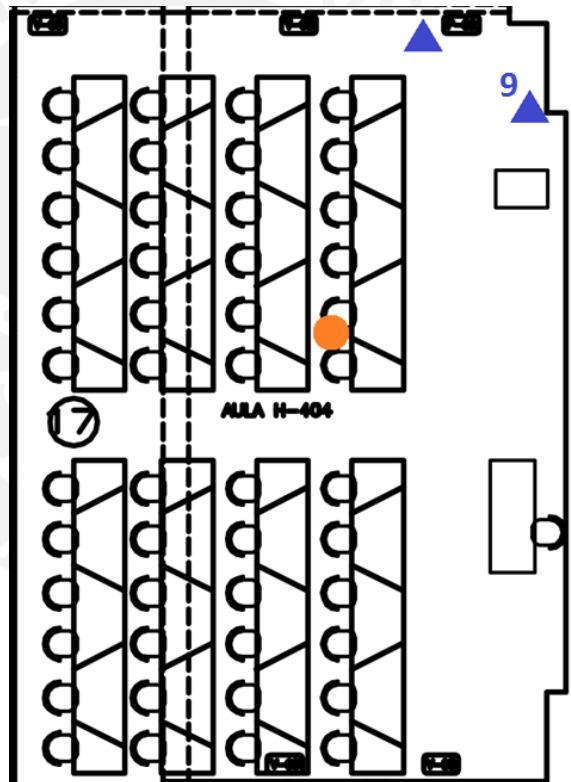


FIGURA 61: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 90°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 12: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 180°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_32	3.01
2	404	H404_30	4.17
3	404	H404_31	4.00
4	404	H404_32	3.01
5	404	H404_51	4.77
6	404	H404_32	3.01
7	404	H404_30	4.17
8	404	H404_31	4.00
9	404	H404_32	3.01
10	404	H404_31	4.00
PROMEDIO ERROR			3.71

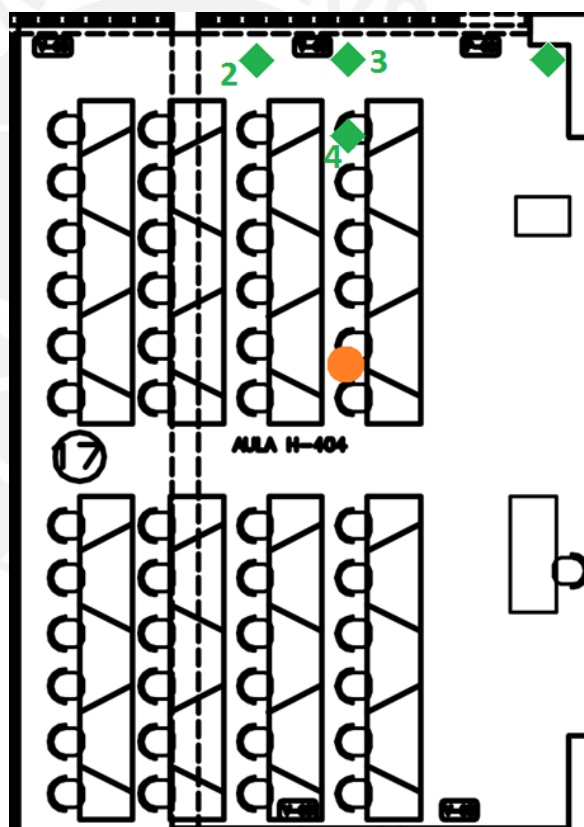


FIGURA 62: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 180°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

TABLA 13: RESULTADOS - ORIENTACIÓN = 270°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

#medicion	Ambiente	PG estimado	Error (m)
1	404	H404_51	4.77
2	404	H404_52	3.98
3	404	H404_52	3.98
4	404	H404_32	3.01
5	404	H404_52	3.98
6	404	H404_31	4.00
7	404	H404_32	3.01
8	404	H404_52	3.98
9	404	H404_52	3.98
10	404	H404_52	3.98
PROMEDIO ERROR			3.87

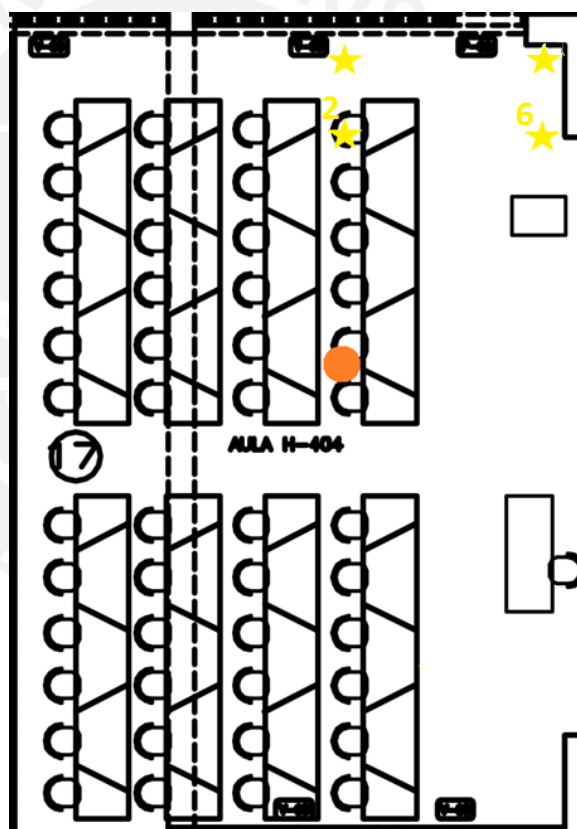


FIGURA 63: ESTIMACIÓN POSICIÓN DESV.EST 0, 270°  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede apreciar, establecer la desviación estándar en 1 ha hecho que el error disminuya mínimamente para cada escenario; también se mantiene la predicción correcta del ambiente en el 100% de los casos.

Como se observa, el error para todos los casos es mayor a 3.7m. Esto se debe, en parte, a la configuración dinámica de los APs por parte del controlador de red, lo que varía, entre otras cosas, el canal y el nivel de la potencia de transmisión de los APs, valores críticos para el algoritmo, ya que de ellos depende la potencia transmitida (en dBm) de los APs, por lo tanto también variará la potencia recibida por parte del móvil.

Para analizar cómo afecta la variación de las potencias de transmisión y los canales de los APs, se realizaron nuevas mediciones (100 en total) en el aula H304. Esta vez se descargaron además, del Cisco Prime, información de los canales y los niveles de potencia de transmisión en el momento de las mediciones.

Se compararon los niveles de potencia (txpw) y los canales de la medición “actual” con los configurados al momento de armar la BD offline. En la siguiente tabla se muestran los datos:

**TABLA 14: COMPARACION POTENCIA Y CANALES DE TRANSMISION**  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

	'AP_H_304-1'	'AP_H_304-1'	'AP_H_303-1'	'AP_H_303-1'	'AP_H_404-1'	'AP_H_404-1'	'AP_H_301-1'	'AP_H_302-1'
modelo	AIR-CP3702I	AIR-CAP3702I	AIR-CAP3702I	AIR-CAP3702I	AIR-CAP3702I	AIR-CAP3702I	AIR-CAP3702I	AIR-CAP3702I
freq	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz	5GHz	5GHz
old txpw	1 / 15 Dbm	8 / 2 Dbm	1 / 15 Dbm	8 / 2 Dbm	1 / 15 Dbm	7 / 5 Dbm	1 / 15 Dbm	1 / 17 Dbm
old canal	48	1	64	11	44	11	40	64
new txpw	2 / 12 Dbm	8 / 2 Dbm	5 / 11 Dbm	8 / 2 Dbm	2 / 14 Dbm	8 / 2 Dbm	1 / 15 Dbm	4 / 8 Dbm
new canal	40	1	157	11	64	11	40	64

Como se aprecia en la tabla 14, durante las 100 mediciones, el terminal móvil sensó 5 APs (3 dual-band: 2.4 y 5 GHz y 2 sólo a 5 GHz), en total 8 columnas. Se han sombreado de amarillo los cambios que han habido, estos se reflejan en el error que aparece al momento de estimar la posición.

Para ver como incluir la Potencia de Transmisión actual de los APs, utilizaremos las siguientes variables:

$F_p^j$ : Fingerprinting de BD del punto P con respecto al AP (MAC)  $\hat{j}$

$\hat{M}_p^j$ : Medición esperada en el punto P.

$T_B^j$ : Potencia de transmisión (tx pw) del AP  $\hat{j}$  en la BD offline.

$T_A^j$ : Potencia de transmisión actual del AP  $\hat{j}$ .

$G_R^{Air}$ : Ganancia real del USB AirMagnet Proxim Orinoco.

$G_R^M$ : Ganancia real del móvil.

Se puede calcular el pathloss de la medición actual (Pathloss<sub>A</sub>) y de la base de datos (Pathloss<sub>B</sub>):

$$\text{Pathloss}_B = T_B^j - F_p^j + G_R^{Air}$$

$$\text{Pathloss}_A = T_A^j - \hat{M}_p^j + G_R^M$$

Como el pathloss entre un AP y el celular no variara entre la BD y la medición actual, se pueden igualar ambas fórmulas, con lo cual se obtiene:

$$F_p^j - \hat{M}_p^j = T_B^j - T_A^j + G_R^{Air} - G_R^M$$

$$\hat{M}_p^j = F_p^j + T_A^j - T_B^j + G_R^M - G_R^{Air}$$

$$\hat{M}_p^j = F_p^j + \Delta_T^j + \Delta_G$$

Donde:

$\Delta_T^j$  = Diferencia entre Potencia de Transmisión actual y la que se usó en la BD.

$\Delta_G$  = Diferencia entre la ganancia de recepción actual (del móvil) y la de la BD (USB Airmagnet Proxim).

Teniendo en cuenta la potencia de transmisión actual de los APs, se realizó la estimación de la posición para las 100 mediciones, mediante dos métodos: Promedio de las mediciones y Centro de Gravedad (CG).

- i) Promedio de las mediciones, se obtuvo un error de 3m para (i) desviación estándar  $\geq 1.8m$  y un error de 5.15m para (ii) desviación estándar = 1.

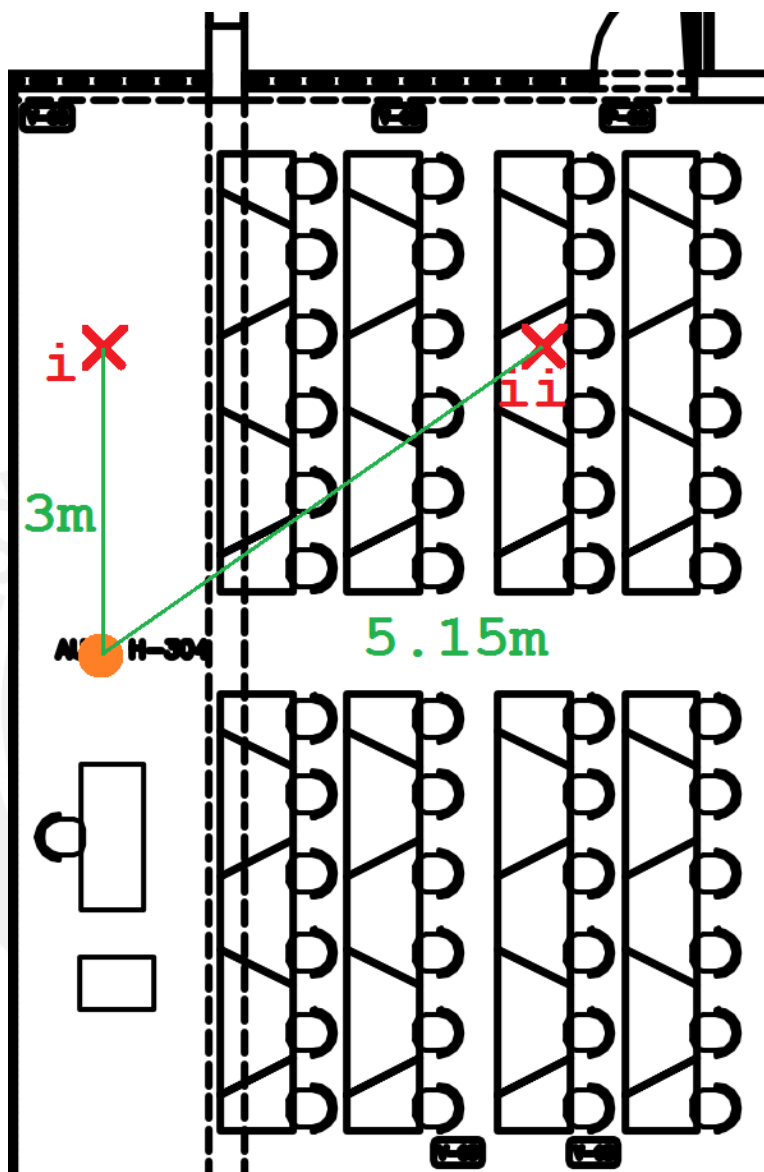


FIGURA 64: ESTIMACIÓN POSICIÓN PROMEDIO 100 MED  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- ii) Desviación estándar = 1, se obtiene CG con un error de 3.94m respecto a la posición esperada (círculo naranja).

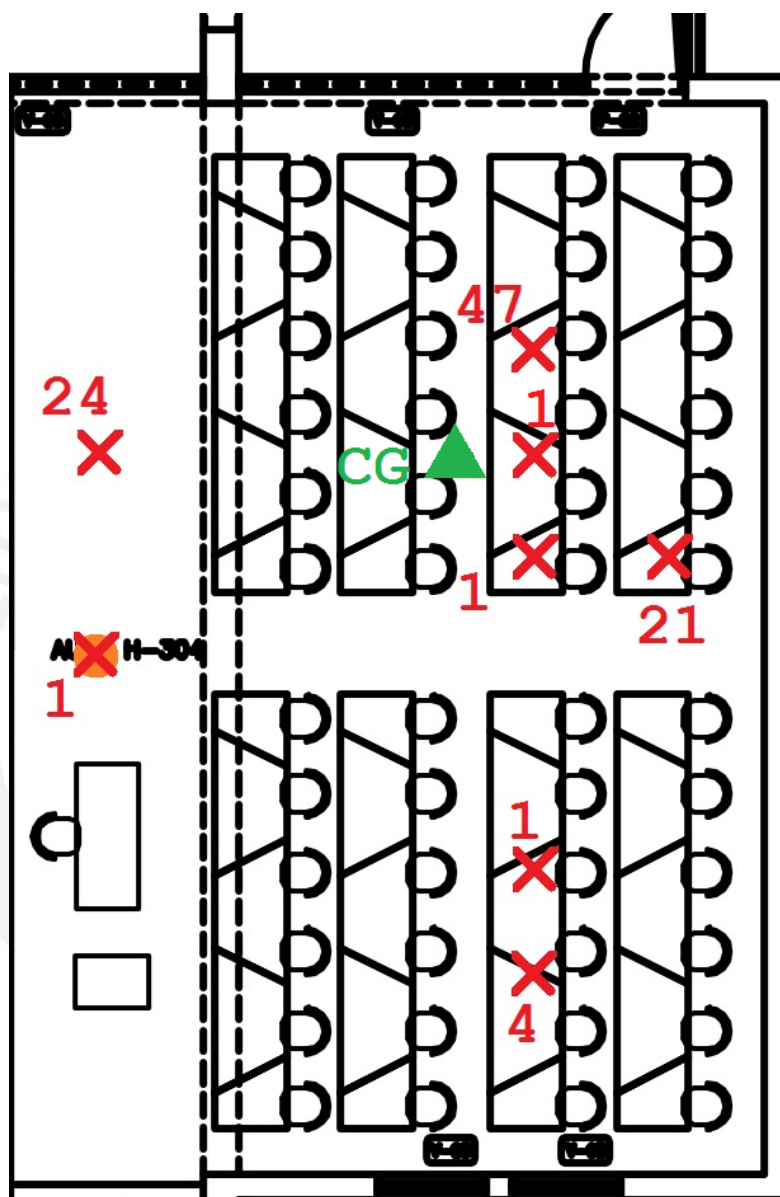


FIGURA 65: ESTIMACIÓN POSICIÓN CG DESV. EST 0  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

- iii) Desviación estándar  $\geq 1.8$  se obtiene un CG con un error de 2.38m respecto a la posición estimada (círculo naranja).

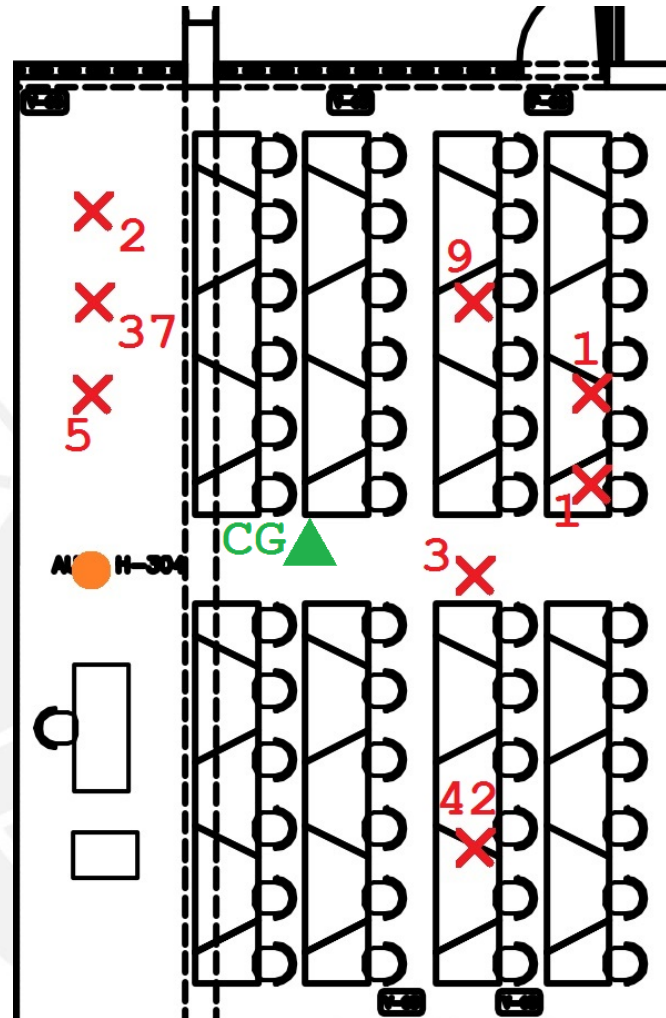


FIGURA 66: ESTIMACIÓN CG POSICIÓN DESV.ESTV 1.8  
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se puede observar en la figura 66, el error disminuyó considerablemente si consideramos la potencia de transmisión actual de los APs, en comparación a los 3.71m si no tomamos en cuenta la potencia actual (tabla 12).

Se puede concluir que el método de Centro de Gravedad es más exacto, ya que disminuyó el error a 2.38 metros, menos de 2 PG a la redonda. Además, como se observó en los resultados, es mejor tomar la desviación estándar  $\geq 1.8$ , ya que para estos casos se obtuvieron las mejores aproximaciones.

## 4.2. Conclusiones y Recomendaciones

Dados los resultados, se puede concluir lo siguiente:

- La solución es viable y la técnica de localización fingerprinting basada en el estimador ML es confiable, ya que obtuvimos una precisión del 100% en la estimación del ambiente y un error menor a 2.4 m (dos PG a la redonda) para el caso de la desviación estándar mayor igual a 1.8.
- Como se observó, la orientación del móvil si tiene impacto sobre el error. Se recomienda usar la app en la línea de visión con el AP principal del ambiente en donde se encuentra el usuario.
- La etapa offline o de calibración es la más crítica, ya que define qué tan precisa será la estimación de la localización. Notar también que a mayor número de recorridos, se tendrán más valores de potencia, con lo cual la desviación estándar sería más confiable y ayudaría a reducir el error de localización sin necesidad de establecerla en 1.
- El hecho de realizar el procesamiento de los datos en Matlab, no descarta que también se pueda implementar el algoritmo en un dispositivo Android, aunque esto implicaría un alto consumo de recursos por parte del móvil, lo que se vería reflejado en un alto consumo de batería.
- Se tiene que estar seguro del modelamiento de la señal (Normal en nuestro caso), ya que el estimador ML varía de acuerdo a la PDF.
- Como trabajo a futuro se puede incluir la medición exacta de la potencia de transmisión de los APs en función del nivel de transmisión, el canal, el modelo del AP y la regulación de frecuencia del país.
- Lo recomendable es dejar configurados la potencia de transmisión y los canales de manera estática, para que no varíen con el tiempo y no tengan impacto sobre la estimación de la posición.
- Para alimentar la base de datos offline se podrían aprovechar los datos que escanea el usuario con su dispositivo android de la red WiFi al momento de ejecutar la aplicación móvil, esto se complementaría con una función adicional de la aplicación que permitiría al usuario colaborar seleccionando la ubicación dentro del ambiente en la que está al momento de usar la aplicación.

## Bibliografía

- [1] GPS.GOV  
GPS Accuracy. Consulta: 13 de mayo de 2015.  
<http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>
- [2] Andro4all  
Androides del pasado, recordando lo que una vez triunfó: HTC Dream. Consulta 20 de Setiembre de 2015  
<http://andro4all.com/2013/07/androides-del-pasado-htc-dream>
- [3] RIBAS, Joan  
2014 *Desarrollo de aplicaciones para Android. Edición 2015*. Madrid: Anaya.
- [4] Android Inc.  
Developers. Consulta: 07 de Setiembre de 2015.  
<http://developer.android.com/>
- [5] Apple Inc.  
Developer. Consulta: 07 de Setiembre de 2015.  
<https://developer.apple.com/>
- [6] Microsoft  
Developer Network. Consulta: 07 de Setiembre de 2015.  
<https://msdn.microsoft.com/>
- [7] Blackberry  
BlackBerry DevZone. Consulta: 07 de Setiembre de 2015.  
<https://developer.blackberry.com/>
- [8] Statista – The Statistics Portal  
Number of apps available in leading app stores as of July 2015. Consulta: 05 de Julio de 2015.  
<http://www.statista.com/statistics/276623/number-of-apps-available-in-leading-app-stores/>
- [9] Statista – The Statistics Portal  
Number of mobile app downloads worldwide from 2009 to 2017 (in millions). Consulta: 05 de Julio de 2015.  
<http://www.statista.com/statistics/266488/forecast-of-mobile-app-downloads/>
- [10] Statista – The Statistics Portal  
Worldwide mobile app revenues from 2011 to 2017 (in billion U.S. dollars). Consulta: 05 de Julio de 2015.  
<http://www.statista.com/statistics/269025/worldwide-mobile-app-revenue-forecast/>
- [11] Gartner  
Gartner Says Worldwide Smartphone Sales Recorded Slowest Growth Rate Since 2013.  
Consulta: 22 de Agosto de 2015.  
<http://www.gartner.com/newsroom/id/3115517>

- [12] Euskadi Tecnología  
ARGUS, sistema de guiado para invidentes con sonidos 3D. Consulta: 24 de Agosto de 2015.  
<http://www.euskaditecnologia.com/argus-sistema-de-guiado-para-invidentes-con-sonidos-3d/>
- [13] BeClose  
BeClose. Consulta: 24 de Agosto de 2015.  
<http://beclose.com/>
- [14] MYSPHERA  
MYSPHERA, Sistema de localización en tiempo real (RTLS). Consulta: 24 de Agosto de 2015.  
<http://mysphera.com/>
- [15] LARSON, Jeffrey S. y otros  
2005 "An exploratory look at supermarket shopping paths". International Journal of Research in Marketing. Pennsylvania, número 22, pp. 395-414.
- [16] Albeitar  
Uso de dispositivos GPS para el seguimiento de rebaños de ovejas en pastoreo. Consulta: 28 de Agosto de 2015.  
<http://albeitar.portalveterinaria.com/noticia/13410/articulos-rumiantes/uso-de-dispositivos-gps-para-el-seguimiento-de-rebanos-de-ovejas-en-pastoreo.html>
- [17] SPARK Compass  
Total Communicator Solutions, Inc.® Consulta: 01 de Setiembre de 2015.  
<http://sparkcompass.com/>
- [18] BUSINESS INSIDER  
Apple Buys Indoor Mapping Company WifiSLAM. Consulta: 03 de Setiembre de 2015.  
<http://www.businessinsider.com/apple-buys-indoor-mapping-company-wifislam-2013-3>
- [19] WIFARER  
Indoor Positioning Technologies. Consulta: 03 de Setiembre de 2015.  
<http://www.wifarer.com/>
- [20] Estimote  
Real-world context for your apps. Consulta: 03 de Setiembre de 2015.  
<http://estimote.com/>
- [21] Pontificia Universidad Católica del Perú  
DescubrePUCP. Consulta: 10 de Setiembre de 2015.  
<http://descubre.pucp.edu.pe/>
- [22] LIU, Hui. y otros  
2007. "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems". IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-part C: applications and reviews. Volumen 37, numero 6, pp. 1067-1080. Consulta: 15 de Setiembre de 2015  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4343996](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4343996)

- [23] WIKIPEDIA La enciclopedia libre  
Precisión y exactitud. Consulta: 15 de Setiembre de 2015.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n\\_y\\_exactitud](https://es.wikipedia.org/wiki/Precisi%C3%B3n_y_exactitud)
- [24] Descubriendo la Física  
El sistema de posicionamiento global GPS y la relatividad. Consulta: 15 de Setiembre de 2015.  
[http://descubriendo.fisica.unlp.edu.ar/descubriendo/index.php/El\\_sistema\\_de\\_posicionamiento\\_global\\_GPS\\_y\\_la\\_relatividad](http://descubriendo.fisica.unlp.edu.ar/descubriendo/index.php/El_sistema_de_posicionamiento_global_GPS_y_la_relatividad)
- [25] Kriptópolis  
Kriptópolis. Consulta: 15 de Setiembre de 2015.  
<http://www.kriptopolis.com/geoposicionamiento-gsm-7>
- [26] CSIE @ NTU  
LIBSVM -- A Library for Support Vector Machines. Consulta 20 de Setiembre de 2015  
<https://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/index.html>
- [27] PRITT, Noah y otros  
2013. "Indoor Positioning with Maximum Likelihood Classification of Wi-Fi signals". SENSORS, 2013 IEEE. Consulta: 20 de Setiembre de 2015  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6688619&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6688619](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6688619&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6688619)
- [28] CISCO  
Cisco Aironet 3700 Series. Consulta 20 de Setiembre de 2015  
<http://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/aironet-3700-series/index.html>
- [29] ACUÑA, Emerson y HERRERA, Renato  
2015 Levantamiento del mapa de atenuaciones de señal electromagnética en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz para la red wireless PUCP. Tesis de licenciatura en Ciencias e Ingeniería con mención en Ingeniería de Telecomunicaciones. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [30] INSTITUTO NACIONAL DE SALUD  
2006 "Un metro cincuenta y siete centímetros es talla promedio de peruanos a nivel nacional". Boletín INSTITUTO NACIONAL DE SALUD. Lima, año 3, número 22. Pag.5.
- [31] FLUKE networks  
AirMagnet Survey. Consulta: 20 de Setiembre de 2015.  
<http://www.flukenetworks.com/products/airmagnet-survey>
- [32] BarcodesInc  
Proxim Wireless ORiNOCO Client Cards/Adapters. Consulta: 20 de Setiembre de 2015.  
<https://www.barcodesinc.com/proxim-wireless/orinoco-client-cards-adapters.htm>