

**PROPUESTA DE MEJORA OPERATIVA PARA EL RADAR
METEOROLÓGICO VAISALA WRM200, INTEGRADO A LA
RED DE RADARES METEOROLÓGICOS DE LA
AERONÁUTICA CIVIL PARA LA PRESTACIÓN DEL
SERVICIO METEOROLÓGICO AERONÁUTICO EN
COLOMBIA**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autor

Jassir Sneider Agressoth Cardona

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Telecomunicaciones**

Bogotá D.C. Enero, 2022

**PROPUESTA DE MEJORA OPERATIVA PARA EL RADAR
METEOROLÓGICO VAISALA WRM200, INTEGRADO A LA
RED DE RADARES METEOROLÓGICOS DE LA
AERONÁUTICA CIVIL PARA LA PRESTACIÓN DEL
SERVICIO METEOROLÓGICO AERONÁUTICO EN
COLOMBIA**



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autor

**Jassir Sneider Agressoht Cardona, 20201373017,
jsagressoht@correo.udistrital.edu.co**

Modalidad

Monografía

Presentado para optar al título de: Ingeniero en Telecomunicaciones

Director

Ing. Edgar Leonardo Gómez Gómez MSc.

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Telecomunicaciones**

Bogotá D.C. Enero, 2022

Dedicatoria

Dedico este proyecto, en primer lugar, a los funcionarios de la Aeronáutica Civil, que me brindaron su confianza y me permitieron contribuir de forma positiva a la institución.

A mi asesor, el Ing. Leonardo, por su constante y amable acompañamiento durante este proceso.

A mi familia y a mi querida Estefanía por su ayuda incondicional.

Índice de Contenido

Dedicatoria	3
Índice de Figuras	7
Índice de Tablas	10
Índice de Anexos	11
Lista de Abreviaturas y Siglas	12
Resumen	14
1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación	4
4. Objetivos	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos Específicos	5
5. Marco de Referencia	6
5.1. Antecedentes	6
5.1.1. Breve descripción de las tecnologías e instrumentos de los radares meteorológicos (A Brief Overview of Weather Radar Technologies and Instrumentation) (Yeary et al., 2014)	6
5.1.2. El papel del radar meteorológico en la estimación de las precipitaciones y su aplicación en la modelización meteorológica e hidrológica - Una revisión (The Role of Weather Radar in Rainfall Estimation and Its Application in Meteorological and Hydrological Modelling- A Review) (Sokol et al., 2021)	6
5.1.3. Imágenes de radar meteorológico de doble polarización en banda C de la Erupción Te Maari del 6 de agosto de 2012, Monte Tongario, Nueva Zelanda (Dual polarization C-band weather radar imagery of the 6 August 2012 Te Maari Eruption, Mount Tongario, New Zealand) (Crouch, Pardo y Miller, 2014)	7
5.1.4. Aplicación del radar meteorológico Doppler en el control de calidad en tiempo real de las precipitaciones horarias en el este de China (Application of the Doppler weather radar in real-time quality control of hourly gauge precipitation in Eastern China) (Zhong et al., 2016)	8

5.1.5. Calibración hidrológica de radares meteorológicos (Baldemar et al., 2015)	9
5.1.6. Nuevo enfoque para la calibración de la precipitación del radar meteorológico de banda C local (New approach for local C-band weather radar precipitation calibration) (Ávila et al., 2021)	10
5.1.7. Radares Meteorológicos de bajo costo para la detección de precipitación y desarrollo de operaciones Aéreas en Colombia (Acosta, 2013).....	10
5.1.8. Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del AMVA (Sepúlveda, 2016)	10
5.1.9. Análisis de datos de Radares Meteorológicos en el territorio colombiano para el diagnóstico y detección de errores (Gómez et al., 2018).....	11
5.1.10. Diseño e implementación de una herramienta de software libre para la detección y corrección de propagaciones anómalas en radares meteorológicos para zonas ecuatoriales (Calderón y Redondo, 2019)	12
5.2. Marco Teórico	12
5.2.1. Radar Meteorológico	13
5.2.2. Parámetros de configuración en el radar	18
5.2.3. Productos de un radar Meteorológico.....	20
5.2.4. Frecuencia y Longitud de Onda.....	21
5.2.5. Fundamentos de radiación del radar	24
5.2.6. Ecuación del radar	29
5.2.4. Redes de Radares Meteorológicos.....	34
5.3. Marco Legal	34
5.3.1. RAC 203 Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea.....	35
5.3.2. RAC 210 Telecomunicaciones Aeronáuticas	35
5.3.3. NTC-ISO 14001 Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con orientación para su uso	37
5.3.4. RAC 203 Resolución #01284 de 2020	38
5.3.5. Anexo 10- Volumen V OACI-Telecomunicaciones aeronáuticas	39
5.3.6. Anexo 10- Volumen III OACI-Sistemas de comunicaciones	39
5.3.7. Anexo 3- OACI-Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional	39
6. Metodología	41
6.1. Fase I: Búsqueda de Información Técnica en Medios Web	42

6.2. Fase II: Análisis Técnico-Operativo del Vaisala WRM200	43
6.3. Fase III: Planteamiento de la Mejora Operativa	47
7. Desarrollo y Resultados	49
7.1. Diagnóstico del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Colombia (SNMRC)	49
7.2. Funcionamiento y Operatividad del Radar Meteorológico WRM200	53
7.2.1. Estructuración de la Red de Radares en la Aerocivil (ATN)	58
7.2.2. Evaluación del Control del Radar- Software IRIS	60
7.3. Propuesta de Mejora	66
7.3.1. Diseño Definitivo de Propuesta de Mejora	66
7.3.2. Validación de la Solución	77
7.3.3. Limitaciones de la Solución	79
7.3.4. Evaluación del Impacto	79
8. Conclusiones y Recomendaciones	80
9. Referencias	82
10. Anexos	85

Índice de Figuras

Figura 1. Ecos del radar al inicio de la erupción (Crouch, Pardo y Miller, 2014)	8
Figura 2. Diagrama de flujo para calidad pluvial (Zhong et al., 2016)	9
Figura 3. Decodificación del valor binario del clasificador (Gómez et al., 2018)	11
Figura 4. Flujograma de transformación de datos (Gómez et al., 2018)	11
Figura 5. Principio básico del radar (Elaboración propia).....	13
Figura 6. Diagrama de bloque WRM200 (Vaisala, 2019, 13).....	14
Figura 7. Radar meteorológico Vaisala WRM200 sector Tablazo (Elaboración propia)	15
Figura 8. Cuarto de control y torre del radar Vaisala WRM200 (Elaboración propia).....	15
Figura 9. RAC Vaisala WRM200 Sector Tablazo (Elaboración propia)	16
Figura 10. Interfaz software IRIS (Elaboración propia).....	17
Figura 11. Menú Task Configuration (Elaboración propia).....	19
Figura 12. Ejemplo de refracción de la luz en una longitud de onda óptica (Rauber y Nesbitt, 2018).....	22
Figura 13. Ejemplo de reflexión de una onda (Rauber y Nesbitt, 2018).....	22
Figura 14. Ubicación del radar sobre la cumbre del cerro Tablazo (Elaboración propia)	24
Figura 15. Análisis de los campos en una antena parabólica (Arrambí Díaz, 2005).....	25
Figura 16. Análisis de los campos en una antena parabólica (Vaisala, 2019, 4).....	28
Figura 17. Tipos de hidrometeoros en la nube en relación con los criterios de Rayleigh para el tamaño y la forma (Rauber y Nesbitt, 2018)	34
Figura 18. Adjudicación de frecuencias de los Servicios Aeronáuticos por parte de MinTIC (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020).....	37
Figura 19. Diagrama de bloque metodología (Elaboración propia)	41
Figura 20. RAC del servidor radares en el CGAC (Elaboración propia)	43
Figura 21. Reconocimiento del servidor del CGAC a través de Key Visual Mouse (KVM). (Elaboración propia).....	44

Figura 22. Realización de evaluación del Radar WRM200 sector Tablazo (Elaboración propia)	44
Figura 23. Realizando diagnóstico del radar WRM200 Sector Tablazo (Elaboración propia)	45
Figura 24. Reconocimiento del radomo de la antena del radar WRM200 (Elaboración propia)	45
Figura 25. Producto de radar desde servidor Main del CGAC (Elaboración propia)	46
Figura 26. Interfaz software de control del radar (Elaboración propia)	46
Figura 27. Data center CGAC (Elaboración propia)	47
Figura 28. Servidores (Web, Backup y Main) de los radares Aerocivil (Elaboración propia)	48
Figura 29. Interfaz de configuración de tareas del radar WRM200 (Elaboración propia)	48
Figura 30. Diagrama de la estructura operacional de la Aerocivil (Elaboración propia)	49
Figura 31. Radares meteorológicos de Colombia (IDEAM, 2019)	51
Figura 32. Conexión de VPN bidireccional Aerocivil e IDEAM (IBM, 2000)	52
Figura 33. Polarización vertical y horizontal de una onda electromagnética (Raubert y Nesbitt, 2018)	53
Figura 34. Diagrama del hardware del radar (Vaisala, 2019)	55
Figura 35. Componentes RAC VaisalaWRM200 sector Tablazo (Elaboración propia)	55
Figura 36. Radar WRM200 Vaisala sector Tablazo (Elaboración propia)	56
Figura 37. Disposición de Hardware en el gabinete del radar (adaptado de Vaisala, 2019)	57
Figura 38. Diagrama de flujo operación del radar Vaisala (Aerocivil, 2017)	57
Figura 39. Servicios de la Red ATN (Aerocivil, 2017)	58
Figura 40. Migración de Red Informática a Red ATN (Aerocivil, 2017)	59
Figura 41. Conexión Remota de Main hacia Tablazo (Elaboración propia)	59
Figura 42. Configuración de Red de radares Aerocivil (Elaboración propia)	60
Figura 43. Arquitectura del Software IRIS (Vaisala, 2019)	61
Figura 44. Proceso de generación de productos de radar (Elaboración propia)	62

Figura 45. Tarea inicial del radar (Elaboración propia)	63
Figura 46. Productos de salida desde Iris Radar (Elaboración propia)	64
Figura 47. Producto CAPPI-Asterix (Elaboración propia).....	64
Figura 48. Figura 48. Producto HCLASS (Elaboración propia)	65
Figura 49. Producto VIL (Elaboración propia)	65
Figura 50. Producto Rain (Elaboración propia).....	66
Figura 51. Patrones de cobertura del radar WRM200 (Munar y Ramirez, 2021)	67
Figura 52. Relación Rango vs. FRP (Elaboración propia)	68
Figura 53. Ecos de segundo viaje (Elaboración propia).....	69
Figura 54, Realización de radio sondeo (Elaboración propia)	73
Figura 55. Dato de radiosonda para verificación de Isoterma (Elaboración propia).....	74
Figura 56. Configuración de la tarea actual (Elaboración propia)	74
Figura 57. Volumen de cobertura de AERO_JAC (Elaboración propia)	75
Figura 58. Subtarea 1 AERO_JAC_A (Elaboración propia).....	75
Figura 59. Subtarea 2. AERO_JAC_B (Elaboración propia).....	76
Figura 60. Subtarea 3 AERO_JAC_C (Elaboración propia).....	76
Figura 61. Alcance Máximo del Haz con respecto a los ángulos de elevación de la antena (Elaboración propia).....	77
Figura 62. Mejoras con respecto a la antigua tarea (Elaboración propia)	77
Figura 63. PPI (Elaboración propia).....	78
Figura 64. Reflectividad mejorada (Elaboración propia).....	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Componentes generales de un radar (Rosengaus, 1995)	16
Tabla 2. Parámetros de radar banda S (Universidad Politécnica de Catalunya, s.f.)	23
Tabla 3. Parámetros de radar banda C (Universidad Politecnica de Catalunya, s.f.)	23
Tabla 4. Parámetros de radar banda X (Universidad Politecnica de Catalunya, s.f.)	23
Tabla 5. Estado de los radares MET en Colombia (Elaboración propia)	51
Tabla 6. Especificaciones técnicas generales del WRM200 (Elaboración propia)	54
Tabla 7. Parámetros de configuración de tarea SURV_HV_300 (Elaboración propia)	68
Tabla 8. Alturas máximas de los haces para la tarea SURV_HV_300 (Elaboración propia) .	70
Tabla 9. Diagnóstico técnico (Elaboración propia)	71

Índice de Anexos

Anexo 1. Asistencia charla de radares.....	85
Anexo 2. Carta de reconocimiento y aprobación por la realización de la mejora operativa..	86
Anexo 3. Certificado en Taller de Seguridad de la Aviación Civil.....	87
Anexo 4. Convenio de cooperación meteorológica AMVA e IDEAM.....	88
Anexo 5. Participación como ponente en el primer encuentro de investigación de TECRED	90

Lista de Abreviaturas y Siglas

Sigla/Abreviatura	Significado
Aerocivil	Aeronáutica Civil
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
ATN	Aeronautical Telecommunications Network
ATSP	Proveedor de Servicios de Tránsito Aéreo
ATSEP	Air Traffic Safety Electronics Personnel
AWOS	Automatic Weather Observation System
CAPPI	PPI de altitud constante
CGAC	Centro de Gestión Aeronáutica de Colombia
CNAP	Centro Nacional de Análisis y Pronósticos Meteorológicos Aeronáuticos
CNSP	Proveedor de los servicios de comunicaciones y navegación aérea
HMAX	Producto de altura de intensidad máxima
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
IDIGER	Instituto Distrital de Gestión de Riesgos
IFDR	Unidad del Receptor Digital de Frecuencia Intermedia
IKE	Internet Key Exchange
IP	Internet Protocol
IRIS	Software de Radar Meteorológico Vaisala
KVM	Key Visual Mouse
MET	Meteorología
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
OTG	Off The Grid
PPI	Indicador de posición en plano

RAC	Reglamento Aeronáutico de Colombia
RAIN	Acumulación de Lluvia
RAINFALL	Intensidad de precipitación
RCP	Radar Control Processor
RLAN	Redes Radioeléctricas de Área Local
RVP	Procesador de señales del radar
S. A	Servicio Aeronáutico
SARPS	Standard and Recommended Practices
SIATA	Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SNRMC	Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Colombia
SSH	Secure Shell
Telnet	Telecommunication Network
TCP	Transmission Control Protocol
Tops	Mapa de ecos superiores
UAEAC	Unidad Administrativa Aeronáutica Civil
UDP	Unidad de Distribución de Energía
VIL	Líquido Integrado de forma Vertical
VPN	Virtual Private Network
VVP	Procesamiento de Volumen de Velocidad
WOM	World Meteorological Organization

Resumen

En Colombia la prestación del Servicio Meteorológico Aeronáutico en el ámbito civil es realizada por la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil). Este servicio es fundamental para mantener la seguridad operacional de los vuelos que hacen uso del espacio aéreo colombiano y, por lo tanto, garantiza la seguridad de los pasajeros que utilizan el transporte aéreo. Así mismo, la Aerocivil tiene a su disposición una red de radares meteorológicos que brinda información del comportamiento de diferentes fenómenos atmosféricos. Esta red está conformada por 4 radares propios de la entidad distribuidos en las siguientes locaciones: El Tablazo-Bogotá, San Andrés, Corozal-Sucre y Pasto-Nariño. Estos radares se conectan entre sí conformando una red nacional de radares que transmiten su información meteorológica a través del Protocolo de Internet (IP), la cual consiste en una comunicación por envío de datos digitales, almacenados y actualizados en servidores Telnet.

Dentro de la red de radares de la Aeronáutica Civil se encuentra específicamente el radar Vaisala WRM200 ubicado en El Tablazo y cuya capacidad no estaba siendo aprovechada al máximo por la Entidad debido a que no se contaba con los recursos de personal ni el conocimiento específico del equipo y de su integración a la red, según informó el coordinador del Grupo de Sistemas para la Meteorología Aeronáutica de la Aerocivil. Dicha subutilización afecta directamente el rendimiento del radar, la calidad de la prestación del Servicio Meteorológico Aeronáutico y la integración del equipo con el Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, el cual es una red técnica que interconecta radares meteorológicos de otras entidades del país (IDEAM, SIATA e IDIGER). Aunque esta red está operando de forma técnica, aún no se constituye como una red formal por vacíos administrativos que, en la actualidad, febrero de 2022, se siguen tratando.

En ese sentido, se llevó a cabo un análisis del funcionamiento técnico y operativo del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, así como de identificar las capacidades operativas que posee el Vaisala WRM200 y su aplicabilidad en el espacio aéreo colombiano según las condiciones específicas de este, condiciones que se mencionan en la sección 7.3.1 en la descripción de los objetivos específicos de la nueva tarea propuesta para el radar. Todo lo anterior se hizo con el propósito de construir una propuesta de mejora operativa para el uso del radar. Específicamente, se realizó un cambio en la estrategia de escaneo y recepción meteorológica del radar.

Con la intervención se pudo observar que se mejoró el rendimiento y las capacidades del radar, impactando en una mayor resolución temporal y espacial en la recolección de datos sobre objetivos meteorológicos, logrando además amplificar la cantidad de muestras recolectadas de la atmósfera, lo cual permite que el radar sea más preciso y sus productos menos ambiguos.

Por lo tanto, se concluyó que la implementación de la nueva estrategia fue un éxito, como se demuestra en la sección de resultados del documento y se sustenta en el reconocimiento elaborado por el Director de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, dicho reconocimiento se puede evidenciar en la sección de Anexos. En cuanto a resolver el principal problema de subutilización de la herramienta, se logró explotar eficientemente las capacidades del equipo, incrementando así las tareas técnicas que realiza y, por lo tanto, la calidad en la prestación del Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia.

Palabras claves: Aeronáutica, Meteorología, Radar, Red, Servidor, Servicio Meteorológico, Vaisala

1. Introducción

El radar meteorológico fue uno de los grandes avances tecnológicos provenientes de la constitución y/o establecimiento de la radio como herramienta de comunicación. Hoy en día se tienen diferentes tipos de radares meteorológicos definidos para distintos usos y su invención, tal como afirmó Rinehart (2007) lo convirtió en “(...) una de las más importantes herramientas meteorológicas en uso actualmente” (p.15).

Uno de los campos en el cual se emplean los radares meteorológicos es la industria aeronáutica. Esta herramienta de comunicaciones permitió reducir la tasa de accidentes aéreos desde su implementación en el Siglo XX, pasando de un 31% a un 24%, mientras que para el año 2019 la tasa de accidentalidad causada por adversidades meteorológicas se redujo a un 17% (Meteosim, 2019). Sin embargo, la meteorología adversa sigue siendo la principal causa de accidentes aéreos en el mundo. Debido a ello, es necesario que la industria aeronáutica se mantenga a la vanguardia en innovación tecnológica de equipos tales como los radares meteorológicos con el fin de mejorar la seguridad y eficiencia del sector aéreo.

Por lo anterior, y en consecuencia de la necesidad de mejorar la seguridad del tráfico aéreo, en el año 2011 la Aeronáutica Civil (Aerocivil) adquirió el que sería el primer radar meteorológico de Colombia, ubicado sobre el sector Tablazo-Subachoque (Cundinamarca). Esto posibilitó que el transporte aéreo colombiano pudiera contar con una herramienta fundamental para realizar pronósticos meteorológicos de forma unívoca. En años posteriores la Aeronáutica Civil adquirió más radares meteorológicos para cubrir más áreas del territorio colombiano, llegando a tener en la actualidad 4 radares en uso: Tablazo, San Andrés, Corozal y Pasto; así como 3 más en proceso de instalación: Tasajero, Riohacha y Quibdó. Aunque la implementación de la propuesta de mejora operativa que describe este documento se realizó para el radar del Tablazo, la Aeronáutica Civil expresó la necesidad de realizar propuestas similares con base a la realizada en el Tablazo para el resto de sus radares, teniendo en cuenta las variables atmosféricas (Isoterma), obstáculos geográficos del terreno y piso térmico en el que están emplazados cada uno de los radares, como se describe en la sección de recomendaciones.

El principal propósito para la adquisición de los radares meteorológicos por parte de la Aeronáutica Civil es poder alertar a las aeronaves sobre condiciones peligrosas de tiempo climático en las áreas próximas a los mismos. No obstante, el coordinador del Grupo de Sistemas para Meteorología Aeronáutica de la Aerocivil, el Ingeniero Yonatan Montoya Peña, que a febrero de 2022 continúa en el cargo, detectó, junto al Grupo de Soporte para Sistemas Meteorológicos de la Aerocivil en el 2014 que la capacidad del radar ubicado en el Tablazo no estaba siendo totalmente aprovechada por la Institución, a pesar de que su modo de exploración había sido optimizado para la detección de hidrometeoros. Por ende, en este documento se desglosa la estrategia de trabajo necesaria para garantizar una mejora en el uso de las capacidades de dicho radar para su completo aprovechamiento, a fin de que satisfaga las necesidades aeronáuticas.

El radar del Tablazo es de la marca finlandesa Vaisala y de referencia WRM200. La revista Semana (2011) lo describió como “un radar meteorológico de tecnología de punta que proporciona mediciones meteorológicas completas y confiables”. En este documento se describe su proceso de intervención rigurosa, a partir de su integración en el Sistema Nacional de Radares Meteorológicos

de Colombia (SNRMC), (Sistema que actualmente (febrero 2022) no está constituido formalmente por impedimentos administrativos, pero que sí está operando de forma técnica), su capacidad técnica y la optimización de su modo de exploración o mejora operativa.

2. Planteamiento del Problema

Los equipos meteorológicos de última generación que posee la Aeronáutica Civil son fundamentales para la prestación de los servicios a la navegación aérea en Colombia, ya que suministran la información relevante para que los vuelos diariamente realizados a nivel nacional se puedan llevar a cabo con total seguridad y, además, no pongan en riesgo vidas humanas. No obstante, la capacidad operativa de estos equipos no está siendo aprovechada al máximo por la Entidad debido a que no se cuenta con recursos de personal, ni el conocimiento específico sobre ellos. En el caso concreto del Radar meteorológico Vaisala WRM200, de acuerdo con lo referido por el coordinador del Grupo de Sistemas para la Meteorología Aeronáutica de la Aerocivil, el Ingeniero Yonatan Montoya, es un equipo cuyas capacidades totales están siendo explotadas en tan solo un 10 %, problema que limita los beneficios que podrían obtenerse a partir de su operación, desaprovechando así la vanguardia tecnológica que dicho equipo promete al sector aeronáutico colombiano (Hernandez, 2014).

De acuerdo con una publicación del Grupo de Divulgación y Prensa (2017), entre los años 2013 y 2016 se realizó una “inversión significativa en infraestructura meteorológica aeronáutica que supera los \$30.000 millones con un servicio de información aeronáutica de 24 horas diarias en tiempo real”. Así, pues, resulta importante darle todo el aprovechamiento posible a esos recursos tecnológicos que son adquiridos por la Entidad, para la puesta en marcha de un servicio que beneficie a todos los colombianos. Por consiguiente, el presente proyecto de Monografía contribuyó con la construcción de una propuesta de mejora operativa para el uso del Radar Vaisala WRM200, que esté basada en su información técnica y que permita explotar eficientemente las capacidades del equipo.

3. Justificación

Este proyecto se realizó en respuesta a la necesidad de explotar en mayor medida las capacidades operativas del Radar Vaisala WRM200 y con el propósito de garantizar un servicio más eficiente en las operaciones aéreas del país.

El principal factor del desaprovechamiento del Vaisala WRM200 se debía a la falta de recurso humano y conocimiento específico en el uso y/o intervención para dicho equipo. Lo anterior dificultaba la integración del radar a la red del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, razón que constituía consecuencias negativas para la Aerocivil en el aprovechamiento de sus capacidades tecnológicas, tal como se especificó en el Planteamiento del Problema.

A partir de la problemática especificada en el capítulo anterior se creó la necesidad de analizar el funcionamiento técnico y operativo del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos, así como de identificar las capacidades operativas que posee el Vaisala WRM200 y su aplicabilidad en el espacio aéreo colombiano según las condiciones específicas del equipo.

Por lo tanto, este proyecto favoreció la calidad en la prestación del Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia por parte de la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea de la Aeronáutica Civil. Igualmente, permitió generar un mayor impacto de desarrollo para el fortalecimiento de las redes de Radares en Latinoamérica, debido a que la información del radar Tablazo es compartida con otras instituciones estatales quienes a su vez comparten su información por medio de convenios con entidades meteorológicas del Caribe como curazao, esto permitió tener una mayor certeza en la monitorización de la zona norte del continente sudamericano y que Colombia siga siendo referente como desde el 2011 lo es para países como México, Argentina y Cuba, quienes son pioneros en información Meteorológica (Grupo de Divulgación y Prensa, 2017).

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Elaborar una propuesta de mejora operativa en el Radar Vaisala WRM200 que permita el incremento de las tareas técnicas que este realiza, para su uso por parte de la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea de la Aeronáutica Civil, en la prestación del Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un análisis técnico del sistema de telecomunicaciones de la Red de radares meteorológicos de la Aeronáutica Civil y de su integración con el Sistema Nacional de Radares.
- Identificar las capacidades de operación del radar meteorológico marca Vaisala de la referencia WRM200 de acuerdo con su manual técnico, que permita establecer las tareas técnicas que este equipo puede realizar y seleccionar la más adecuada para la propuesta de mejora operativa para el Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia.
- A partir de la identificación de los productos que genera el radar y las tareas técnicas que realiza, elaborar la propuesta de mejora operativa teniendo en cuenta el producto seleccionado, su utilidad y aplicabilidad en el Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia.

5. Marco de Referencia

5.1. Antecedentes

A continuación, se van a resaltar los proyectos que ponen en contexto la actualidad a nivel nacional e internacional, a partir de los desarrollos e innovaciones que se han realizado en radares meteorológicos.

5.1.1. Breve descripción de las tecnologías e instrumentos de los radares meteorológicos (A Brief Overview of Weather Radar Technologies and Instrumentation) (Yeary et al., 2014)

En la revista IEEE *Instrumentation and measurement* se plantea una revisión de las tecnologías en radares meteorológicos que mejoran la detección de tormentas eléctricas, lluvias y tornados en EE. UU. Los autores describen tecnologías de procesamiento de señales y hardware que pueden ser mejoradas en los radares que poseen, ya sea desde software o con modificaciones totales o parciales de los equipos. Se define que uno de los factores claves para la mejora en la detección de fenómenos atmosféricos es la capacidad de escaneo rápido, cualidad con la que cuentan en su mayoría los radares de polarización dual para la clasificación de hidrometeoros y estimación cuantitativa mejorada de la precipitación.

También se verifica el diseño de forma de onda para tecnologías de radares emergentes, donde se especifica que ha sido poco utilizada la tecnología por compresión de pulsos, técnica empleada militarmente pero no dentro de la comunidad de radares meteorológicos, lo cual es un aporte importante en la investigación de los autores ya que dicha técnica proporciona una mayor resolución, tanto espacial como temporal, de los objetivos hidrométricos. En cuanto a diseño de algoritmos, los autores determinaron que los radares polarimétricos brindan una capacidad de datos que incluye reflectividad, velocidad radial media, coeficiente de correlación cruzada, entre otras. Estos son datos base de los radares desde los cuales se puede hacer una mejora para obtener una estimación más precisa. Para ello, Yeary *et al.* (2014) proponen un uso de señales de sobre muestreo de rango que algunos radares ya incluyen por defecto pero que no están siendo usados. Finalmente, exponen la necesidad de hacer una mejora operativa de los radares desde agencias gubernamentales o de la industria privada, ya sea adquiriendo de raíz nuevos equipos o usando las aplicaciones que ya se han madurado en los radares de determinadas especificaciones, de tal manera que sus operaciones puedan ser realizadas en todas las condiciones climáticas, proporcionando ayuda a la mitigación de desastres desde la alerta temprana.

5.1.2. El papel del radar meteorológico en la estimación de las precipitaciones y su aplicación en la modelización meteorológica e hidrológica - Una revisión (The Role of Weather Radar in Rainfall Estimation and Its Application in Meteorological and Hydrological Modelling- A Review) (Sokol et al., 2021)

Consistió en un estudio sobre la ampliación de la operatividad de un radar meteorológico que permita como producto obtener datos con una alta resolución espacial y temporal que mejoran la representación de la lluvia (Sokol *et al.*, 2021). Esta investigación proporciona un buen punto de partida para ser comparada con el radar WRM200, ya que describió el estado general del radar, haciendo énfasis en el uso de los datos en la predicción inmediata de precipitaciones y discutiendo

la importancia del impacto de la alta resolución temporal del radar meteorológico. La revisión respalda la explotación de los datos del radar en toda su capacidad al incluir la obtención de los datos en las aplicaciones hidrológicas.

Finalmente, los autores concluyeron que el radar tenía un enorme potencial para las aplicaciones hidrológicas y que se estaban desaprovechando dichas capacidades al no usarse completamente. La solución que propusieron consistió en centrarse en la alta resolución temporal y espacial para las cuencas pequeñas y en particular las áreas urbanizadas. Sin embargo, la principal limitación del radar para la aplicación hidrológica se encontró en la baja calidad con la que proporciona los datos, lo que impuso un reto para la elaboración de un algoritmo de procesamiento de señales RLAN que permitiera una mejor visualización de los datos. No obstante, esto no eliminó por completo los errores del radar, debido a que al trabajar sobre banda C hay condiciones atmosféricas inherentes que afectan a la operación en este rango de frecuencia, tal como el ruido. (Sokol *et al.*, 2021).

5.1.3. Imágenes de radar meteorológico de doble polarización en banda C de la Erupción Te Maari del 6 de agosto de 2012, Monte Tongario, Nueva Zelanda (Dual polarization C-band weather radar imagery of the 6 August 2012 Te Maari Eruption, Mount Tongario, New Zealand) (Crouch, Pardo y Miller, 2014)

Fue una investigación resultante de la erupción del monte Tongario ocurrida el 6 de agosto de 2012 en Nueva Zelanda. Esta investigación es importante para el presente proyecto ya que evidenció, a nivel tecnológico, una buena configuración de un radar meteorológico, pues estableció que el suceso de la erupción fue el primero en el mundo observado por un radar operativo de polarización dual trabajando en banda C, un radar de características similares al WRM200.

Se estipuló que el radar logró la detección de las partículas de ceniza al usar la tecnología por pulsos, logrando detectar hasta 0.5 mm de diámetro de ceniza (Crouch, Pardo y Miller, 2014). El radar fue capaz de producir escaneos volumétricos tridimensionales de la atmósfera en tiempo real cada 7.5 minutos con un alcance de hasta 250 km, además de producir los datos estándares de actividad. Esto se debió a la gran resolución temporal y de espacio para los componentes de reflectividad, coeficiente de correlación y reflectividad diferencial, atributos importantes para la alerta temprana, detallada del radar a 120 km donde inicia la erupción, como se muestra en la Figura 1.

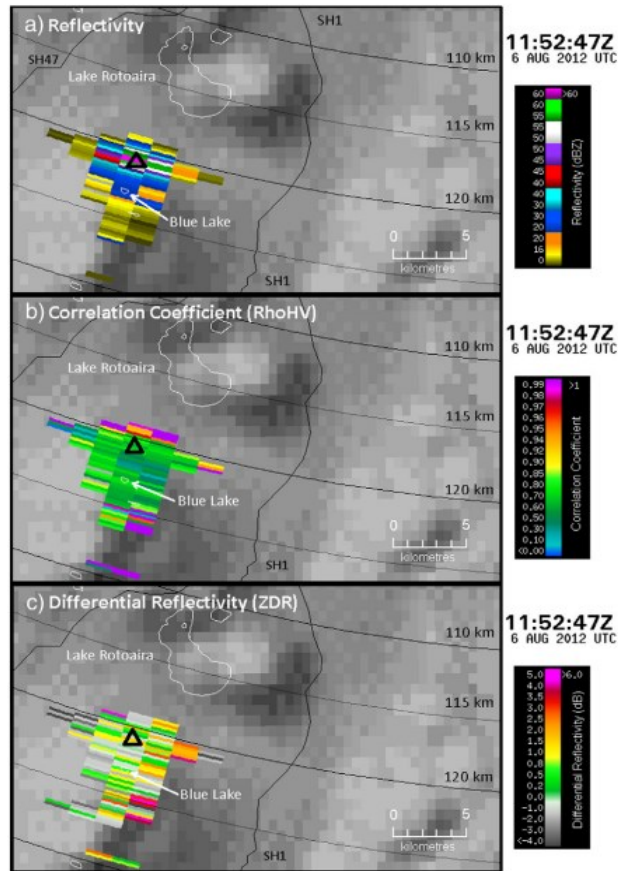


Figura 1. Ecos del radar al inicio de la erupción (Crouch, Pardo y Miller, 2014)

Con imágenes de geotermia y secciones verticales transversales se demostró la efectividad del radar mostrando las nubes de ceniza tras la erupción y la escala de kilómetros vs tiempo que este ofrecía para saber las etapas de la erupción y el riesgo medible. Esta es una importante aplicación que podría ser analizada para implementarla en el proyecto del Vaisala WRM200.

5.1.4. Aplicación del radar meteorológico Doppler en el control de calidad en tiempo real de las precipitaciones horarias en el este de China (Application of the Doppler weather radar in real-time quality control of hourly gauge precipitation in Eastern China) (Zhong et al., 2016)

En este artículo se compararon los métodos usados para obtener los datos en el control de calidad del tiempo en el Este de China. Los autores estudiaron los registros de pluviómetros, los cuales se basan en comparaciones con registros históricos extremos, así como la coherencia espacial y temporal de los registros de lluvia. Se estableció que este método tiene errores cuando las características no son homogéneas debido a precipitaciones intensas. Por ello, se propuso desarrollar un método de calidad operacional soportado por Radar Doppler con el fin de mejorar los registros de precipitación por hora.

El estudio finalizó con el análisis de la comparación entre el antiguo método y el soportado por el radar, encontrando que hay un favorecimiento de las muestras para juzgar la precipitación fluvial

de un 99.95%, lo que significó que el radar tenía la capacidad de hacer juicios correctos para lluvias intensas extremas, siendo muy superior a otros métodos (Zhong *et al.*, 2016). Además, tenía la posibilidad de evaluar la calidad de los registros de precipitación en una red de radares, denominada La Red de Estaciones Provinciales en el Este de China. Para demostrar la fiabilidad del Radar, se creyó necesario implementar un diagrama de flujo, como se muestra a continuación en la Figura 2:

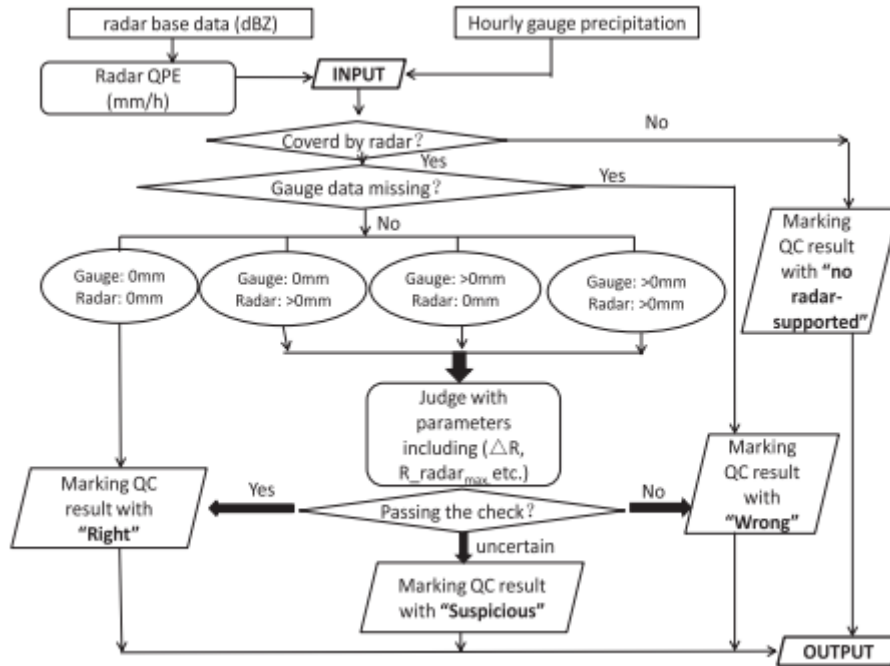


Figura 2. Diagrama de flujo para calidad pluvial (Zhong *et al.*, 2016)

El anterior diagrama de flujo gestiona el control de calidad para la precipitación pluvial horaria y podría ser extendido para diversas aplicaciones de un radar meteorológico (Zhong *et al.*, 2016).

5.1.5. Calibración hidrológica de radares meteorológicos (Baldemar *et al.*, 2015)

En este proyecto de investigación se hizo un estudio de los datos obtenidos inicialmente de los pluviógrafos que usan la herramienta SIG (Sistemas de Información Geográfica). Los autores concluyeron que no se estaban aportando datos que sirvieran para el uso práctico, debido a que las tecnologías usadas no tienen gran densidad espacial. Para corregir este error, hicieron una mejora operativa del Radar Cerro La Catedral en México, aplicando distintos métodos de calibración que permitieran obtener datos más significativos que los anteriores y, por ende, contribuir a la prevención de desastres por lluvia en zonas de alto riesgo (Baldemar *et al.*, 2015). Este estudio de calibración es importante y podría contribuir con la mejora del Vaisala WRM200.

5.1.6. Nuevo enfoque para la calibración de la precipitación del radar meteorológico de banda C local (New approach for local C-band weather radar precipitation calibration) (Ávila et al., 2021)

En este artículo se planteó una nueva forma de calibrar un Radar Meteorológico que permitió ajustar la relación entre los datos de reflectividad y la intensidad de lluvia. Su método consistió en ventanas de tiempo y espacio aplicado a tormentas convectivas y estratiformes. Dicho método, de acuerdo con los autores, podría ser útil para mejorar las estimaciones de la predeterminada de Marshall y Palmer, el cuál es un modelo predefinido en la mayoría de los radares. Si se reemplaza ese modelo por el que propusieron los investigadores, podrían mejorarse las estimaciones del radar de precipitación para la captura de hidrometeoros (Ávila et al., 2021).

5.1.7. Radares Meteorológicos de bajo costo para la detección de precipitación y desarrollo de operaciones Aéreas en Colombia (Acosta, 2013)

Fue una propuesta de desarrollo de radares meteorológicos de bajo costo para territorios complejos y de relieves altos. Buscó la implementación nacional de radares meteorológicos de gran resolución con aplicación en la detección de precipitación en operaciones aéreas. Esto se hizo con el fin de no depender del servicio de radares extranjeros, ya que la capacitación del personal para el manejo y total explotación de los equipos se hace de forma lenta y enrevesada, afectando con deficiencias la información meteorológica y las operaciones aéreas.

La Ing. Acosta (2013) propuso el uso de una red de radares Off the Grid (OTG) que operan en banda X. Esto facilitaría la detección de partículas más pequeñas y con mayor alcance, lo que se traduce en una mayor resolución espacial y, por ende, una detección de alerta temprana más eficiente, actualizando su información cada 3 minutos. Actualmente se encuentran en operación 4 radares OTG en la región Atlántica, pertenecientes al IDEAM.

5.1.8. Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del AMVA (Sepúlveda, 2016)

En la Universidad Nacional de Colombia Sepúlveda (2016) realizó un estudio de la aplicación del radar meteorológico para la detección de precipitaciones, destacando al radar meteorológico como un sensor que “aporta información del fenómeno con una fina resolución espacial y una adecuada tasa temporal de muestreo” (p. 1). La importancia de este trabajo radica en la manera en la que se pueden adaptar y optimizar el conjunto de variables obtenidas por la operación del radar a un modelo matemático que extiende la operatividad del radar de forma teórica, haciendo que las limitantes operativas del radar a nivel físico puedan ser contrarrestadas con un modelo multietapa que relaciona la incertidumbre del histograma de las variables obtenidas mediante el análisis de la intensidad de la precipitación y la reflectividad (Sepúlveda, 2016) Sin embargo, el autor llegó a la conclusión de que no es un modelo extraíble a cualquier dimensión de las aplicaciones del radar, puesto que no se puede tratar de forma determinística las variaciones de los datos. Aun así, el modelo brinda un buen desempeño y acerca en gran medida la posible cuantificación de los datos de precipitación, permitiendo acceder al estudio de datos que el radar, por sus limitaciones, no puede brindar (Sepúlveda, 2016).

5.1.9. Análisis de datos de Radares Meteorológicos en el territorio colombiano para el diagnóstico y detección de errores (Gómez et al., 2018)

Es un artículo de revisión realizado por investigadores de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la Facultad de Ciencias Básicas, en el que se analizaron los datos de dos Radares meteorológicos ubicados en el Tablazo, radar sobre el cual se hizo la implementación de mejora operativa del presente documento, y en Corozal, con el fin de caracterizar los principales observables polarimétricos. En este artículo se resaltó la importancia de la decodificación y transformación de los datos para ser entendidos de forma visible por los meteorólogos y además de ellos mostrar las deficiencias en configuración y calibración que estos radares presentan (Gomez et al., 2018).

Por resultar relevante para la actual Monografía, es válido resaltar la forma de clasificación de variables arrojadas por el radar. De esta manera se entiende la configuración de este y el tipo de conversión que tiene. Por ello, según la investigación de Gomez et al. (2018) se deben obtener valores de 0 a 255, decodificados de decimal a binario de 8 bits. En la Figura 3 se puede evidenciar que cada bit tiene una clasificación representada por C1, C2 y C0.

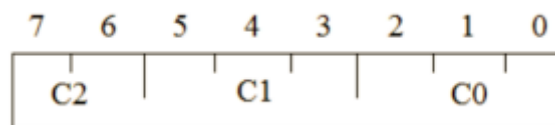


Figura 3. Decodificación del valor binario del clasificador (Gómez et al., 2018)

Teniendo en cuenta la clasificación por bit, los autores hacen una interpretación por clasificador (C1, C2, C0) haciendo la transformación de datos con un flujograma como se evidencia en la siguiente figura.

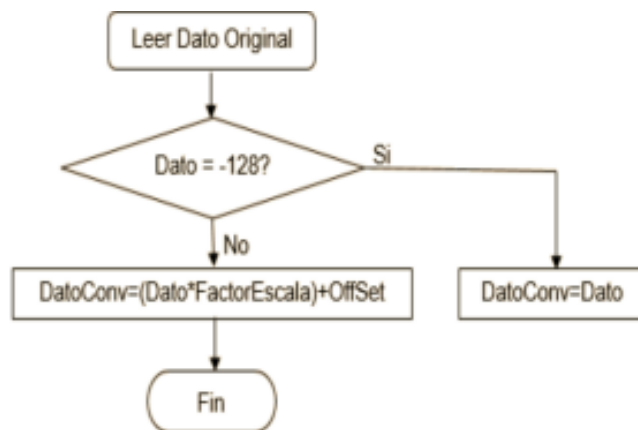


Figura 4. Flujograma de transformación de datos (Gómez et al., 2018)

Figura 4. Flujograma de transformación de datos (Gómez et al., 2018)

Para finalizar la revisión, determinaron que el radar del Tablazo arroja valores de hidrometeoros que no son posibles en la geografía colombiana, por lo que se concluyó que este radar presentaba un problema de configuración, almacenando datos erróneos. Esta investigación resulta ser muy importante ya que permitió tener una base del diagnóstico del radar del Tablazo y evidenció falencias de funcionamiento, tal como se detalló en el Planteamiento del Problema del actual documento. Aunque en la investigación no se especificaron las causas de los datos erróneos arrojados por el radar del Tablazo, es evidente que hubo un objetivo al cual enfocar la mejora operativa del radar.

5.1.10. Diseño e implementación de una herramienta de software libre para la detección y corrección de propagaciones anómalas en radares meteorológicos para zonas ecuatoriales (Calderón y Redondo, 2019)

Calderón y Redondo (2019) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas diseñaron una herramienta de software libre para la detección y corrección de propagaciones anómalas de los datos de un radar meteorológico de banda C operativo en la geografía colombiana. Para ello, realizaron la decodificación de los datos arrojados por el radar usando lenguaje de programación Python. Posteriormente, se realizó una medición de las variables en un algoritmo de Matlab, graficando el volumen de muestreo y haciendo comparaciones con los productos reales del radar.

Las pruebas se hicieron con el radar ubicado en Corozal, operado por la Aerocivil, obteniendo los datos de este en una aplicación interactiva para el usuario, mostrando mediciones anómalas, sin efectos correctivos relevantes en filtros de ventanas de 3x3, por lo que se propuso una configuración al radar en sí y una nueva implementación de aplicaciones con mapas en tiempo real. Finalmente, se determinó que realizar una mejora operativa en los radares, con el fin de aprovechar sus capacidades en mayor medida, es primordial y aceptado por sectores privados y gubernamentales, ya que favorece la seguridad de los individuos y demás aspectos socioeconómicos.

Se cuenta con la ventaja que Colombia es referente en Latinoamérica en la adquisición de nuevas tecnologías Meteorológicas (Grupo de Divulgación y Prensa, 2017), permitiendo el acceso a una capacitación fructífera que mejorará la Red Nacional de Radares Meteorológicos. Por tanto, esta investigación nutre al proyecto del presente documento, ya que evidenció la problemática que existe con los radares al punto de sugerir el análisis e identificación de las capacidades de uno de los radares meteorológicos de operaciones aéreas, para diagnosticar las funciones desaprovechadas y posteriormente ponerla en marcha con el fin de potenciar la calidad en la prestación del Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia por parte de la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea de la Aeronáutica Civil.

5.2. Marco Teórico

El eje central de este proyecto fue el radar meteorológico Vaisala WRM200. Por ende, es necesario plantear algunos parámetros que sirvan de ejes conceptuales sobre los que apoyar la realización del presente proyecto. Dentro de estos se verá la forma detallada de cómo funciona el

radar meteorológico, los fundamentos básicos de radio física que son inherentes al radar, y consideraciones matemáticas del sistema de radar.

5.2.1. Radar Meteorológico

Un radar es un dispositivo de teledetección capaz de localizar precipitaciones, estimar su composición, evolución a corto plazo, calcular su movimiento, dirección del viento y entre muchas otras funciones para fenómenos atmosféricos. Es posible esta teledetección gracias a la emisión de pulsos electromagnéticos del orden del microsegundo en una determinada dirección. Estos pulsos pueden generarse mediante un transmisor, el cual puede ser un magnetrón, un transmisor Klystron o un transmisor de estado sólido, conectado a unas guías de onda hacia una antena parabólica (Xunta de Galicia, 2021).

El principio de funcionamiento del radar consiste en enviar pulsos de microondas y medir cuánto de esas ondas se reflejan en los objetivos que se encuentran en la atmósfera. El radar en sí, es una estación emisora receptora, es decir en pequeños instantes de tiempo emite un pulso de microondas y en otro intervalo de tiempo recibe el eco de la onda transmitida. Estas microondas viajan a la velocidad de la luz, por ende, si se mide el tiempo en el que la onda reflejada vuelve a la antena, es posible determinar la distancia a la que se encuentra el objetivo o blanco meteorológico. En la figura 5, se evidencia de forma gráfica el funcionamiento básico del radar:

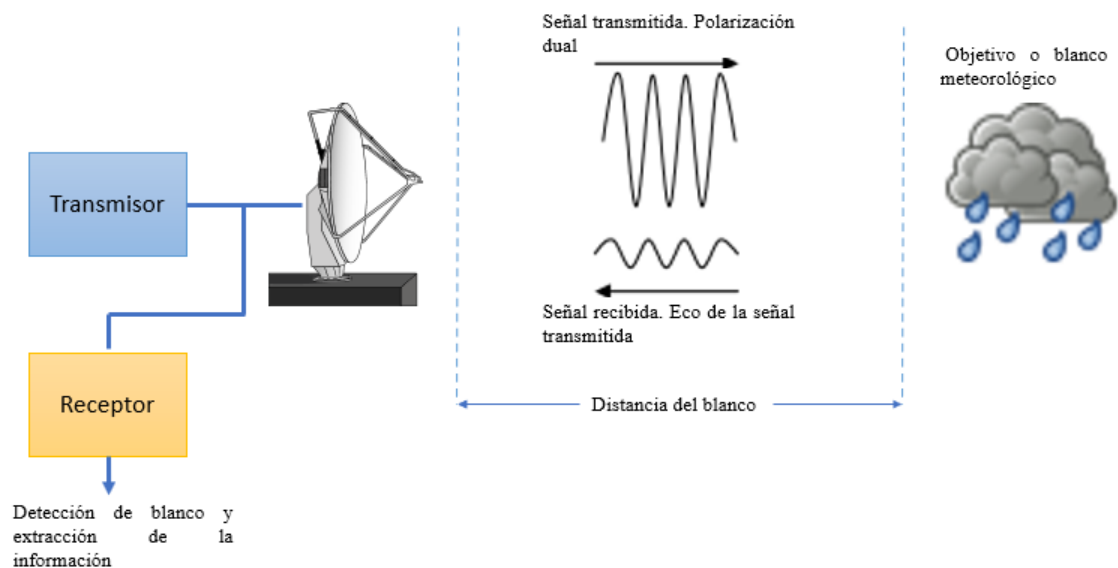


Figura 5. Principio básico del radar (Elaboración propia)

En cuanto al funcionamiento específico del radar, al cual se le hizo la mejora operativa (Vaisala WRM200 del Tablazo), su funcionamiento empieza con una antena parabólica con alimentación central de un diámetro de 4.5 metros. La alimentación de la antena está ubicada en la guía de onda de transmisión donde el radar proyecta microondas al reflector de la antena. Dicha alimentación no es más que una asta corrugada circular con guías de onda de polarización vertical y horizontal. A partir de esta transmite y recibe ondas polarizadas horizontalmente y verticalmente.

Además de la antena, hay un equipo receptor, denominado RVP901, este se encarga de recibir y digitalizar la señal que llegó al radar, para posteriormente enviarla al software del servidor del radar, el cual los procesa y los convierte en datos que puedan ser transmitidos como productos y culminen siendo imágenes interpretables por el meteorólogo.

Cada uno de los transmisores que usan los radares tienen sus pros y sus contras. En el caso del radar WRM200 de Vaisala utiliza un transmisor Magnetron, el cual genera energía electromagnética. El magnetron es un transmisor oscilador de microondas autoexcitado de alta potencia que genera pulsos estrechos. Está equipado con un modulador de estado sólido y es el encargado de producir pulsos cortos de alto voltaje que encienden y apagan el transmisor. El magnetron tiene ciertas limitaciones tales como un gran peso y mayor consumo de potencia con respecto a otros tipos de transmisores, tales como klystron, Helix, Ring-loop, entre otros. Sin embargo, el costo de este tipo de radares es menor y tienen una gran fiabilidad y durabilidad. En la figura 6 se muestra el diagrama de bloques de los sistemas que conforman el radar WRM200 del Tablazo:

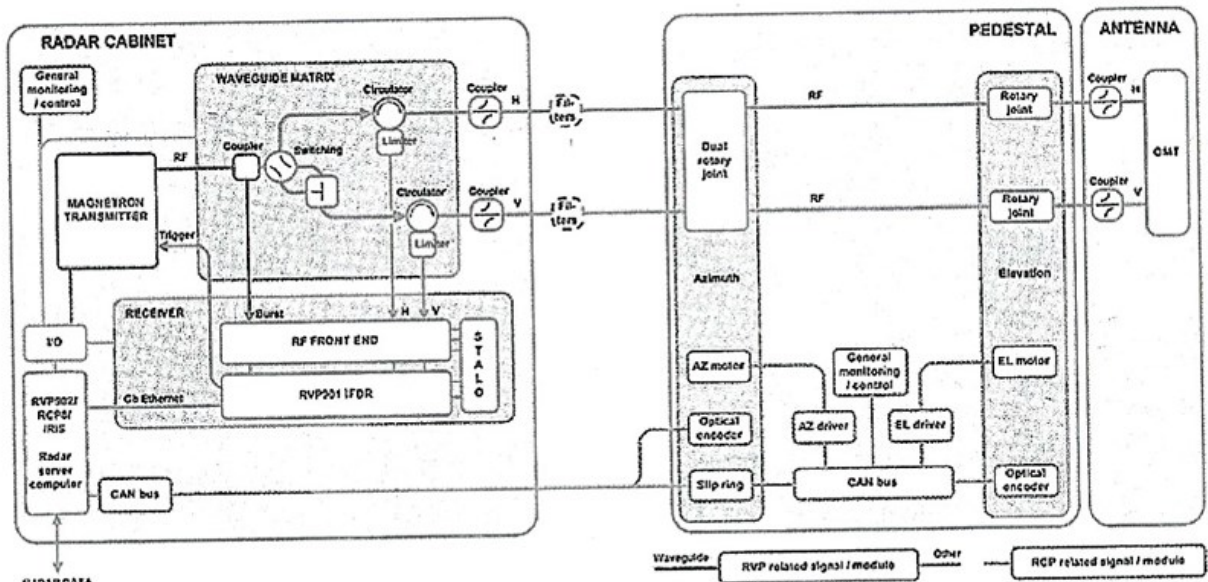


Figura 6. Diagrama de bloque WRM200 (Vaisala, 2019, 13)

A continuación, en las Figuras 7 y 8 se muestra la imagen del radar Vaisala WRM200 del sector Tablazo-Subachoque (Cundinamarca).



Figura 7. Radar meteorológico Vaisala WRM200 sector Tablazo (Elaboración propia)



Figura 8. Cuarto de control y torre del radar Vaisala WRM200 (Elaboración propia)

El WRM200, al ser un radar moderno, se rige al funcionamiento que describe Rinehart (2007): “Los radares modernos usan una sola antena. Estos lanzan pulsos cortos de energía y después esperan a que la señal salga a la velocidad de la luz, choque contra un blanco y regrese hacia la antena” (p.5). Dicho funcionamiento tiene una mayor simplicidad, comparado con el funcionamiento de los primeros radares meteorológicos, los cuales usaban un transmisor que generaba señal de forma continua y estaba conectado directamente a la antena. Las antenas receptoras y transmisoras estaban separadas para que la señal transmitida no saturara al receptor (Rinehart, 2007).

Aunque hay una gran variedad de radares, ya sean modernos o de primera generación y se les den distintos usos, todos los radares, incluyendo el Vaisala WRM200, tiene los componentes que se detallan en la Tabla 1.

Componente	Descripción
Transmisor	Fuente de la radiación Electromagnética emitida por el equipo.
Antena	Transductor que emite la señal electromagnética a la atmosfera.
Receptor	Detecta y recibe la señal emitida por el transmisor y la amplifica
Indicador	Permite al operario ver lo que el radar ha detectado

Tabla 1. Componentes generales de un radar (Rosengaus, 1995)

En la Figura 9 se evidencia la estructura de alimentación, recepción e indicador del radar.



Figura 9. RAC Vaisala WRM200 Sector Tablazo (Elaboración propia)

El RAC que se muestra en la Figura 7, se le denomina servidor del radar. Este ejecuta los softwares del sistema del radar:

- Software de procesamiento de control de radares RCP8 para controlar el movimiento de la antena y el pedestal
- Software del procesamiento de señal del RVP901

- Software de radar IRIS, dicho software es el que se encarga de administrar todo el sistema del radar. En él se puede controlar la antena del radar y definir los parámetros de escaneo, fundamentales para que el radar funcione de forma adecuada. Estos parámetros serán descritos en la sección 5.2.2. A continuación, en la figura 10, se muestra la interfaz del software IRIS visto desde el servidor del radar:

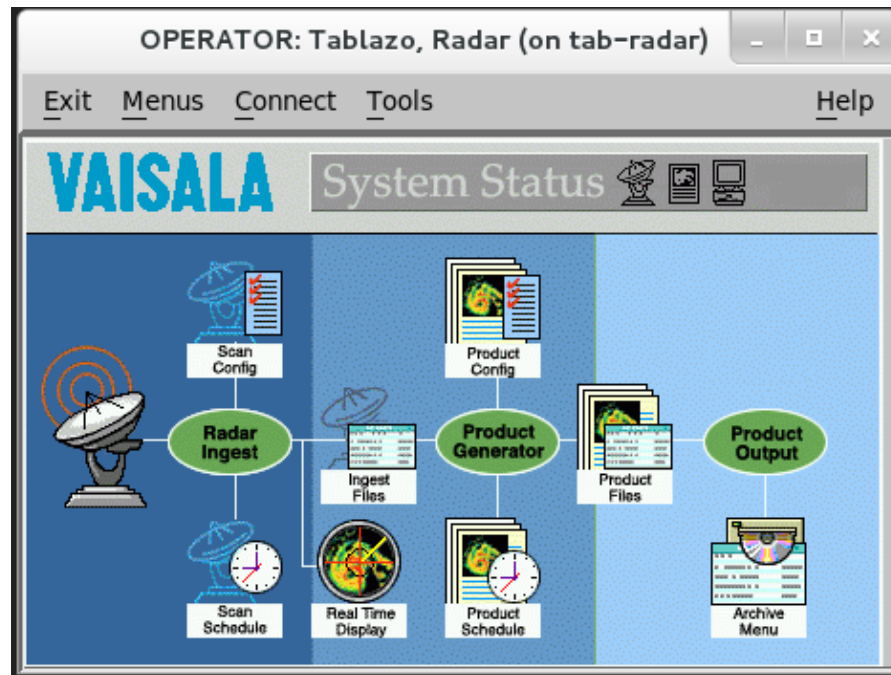


Figura 10. Interfaz software IRIS (Elaboración propia)

El software IRIS, se encuentra instalado tanto en servidor del radar en el Tablazo como en el servidor de la estación de trabajo del Centro de Gestión Aeronáutico de Colombia (CGAC) situado en las inmediaciones del Aeropuerto el Dorado. Del CGAC se habla en la sección 6.2.

En el software IRIS se encuentran varios menús desde los cuales se puede acceder para configurar y/o modificar parámetros del radar y a su vez visualizar productos de radar. En la sección 5.2.4, se explica qué es un producto de radar. Los menús que se encuentran en el software IRIS son los siguientes:

Archive Menu. Controla las operaciones de cinta o DVD de IRIS. Allí se muestran los registros de archivos de datos contenidos en el dispositivo.

Ingest Summary. Enumera los archivos de introducción en un disco. Los archivos de introducción son el conjunto de datos digitalizados por el procesador del radar que contienen la información del escaneo atmosférico realizado.

Messages. Visualiza los mensajes de error y estados de la condición de los archivos, de la red y del radar.

Product configuration. Especifica la configuración del producto. Selecciona la tarea utilizada para la generación del producto y el tipo de producto

Product Output. Muestra qué productos están disponibles en el disco del servidor y selecciona los productos para la transmisión de las imágenes a otros usuarios de la red.

Product Scheduler. Programa el horario de los productos para que se ejecuten.

Projection Menu. Configura las proyecciones del mapa para visualizar el escaneo de multiple radares

Radar Status. Monitorea y controla los componentes de hardware y software del radar.

Real-Time Display. Visualiza la exploración del radar en tiempo real

Task Configuration. Configura las tareas del radar y de sus señales como una exploración de volumen

TSC. Editor. Crea los horarios de las tareas

TSC. Monitor. Ejecuta las tareas programadas

5.2.2. Parámetros de configuración en el radar

La forma en la que se le dice al radar cómo trabajar, qué datos recolectar y sobre qué zonas escanear, es por medio de la configuración de parámetros. En el caso del WRM200, la configuración de los parámetros se hace por medio del software IRIS accediendo al menú Task Configuration. El conjunto de parámetros que determinan la forma en la que un radar opera se le denomina tarea del radar. Si al radar no se le especifica una tarea, este no efectuará ninguna exploración sobre la atmósfera. A continuación, se explicarán cada uno de los parámetros que conforman una tarea y que se visualizan en el menú Task Configuration del software IRIS como se evidencia en la Figura 11:

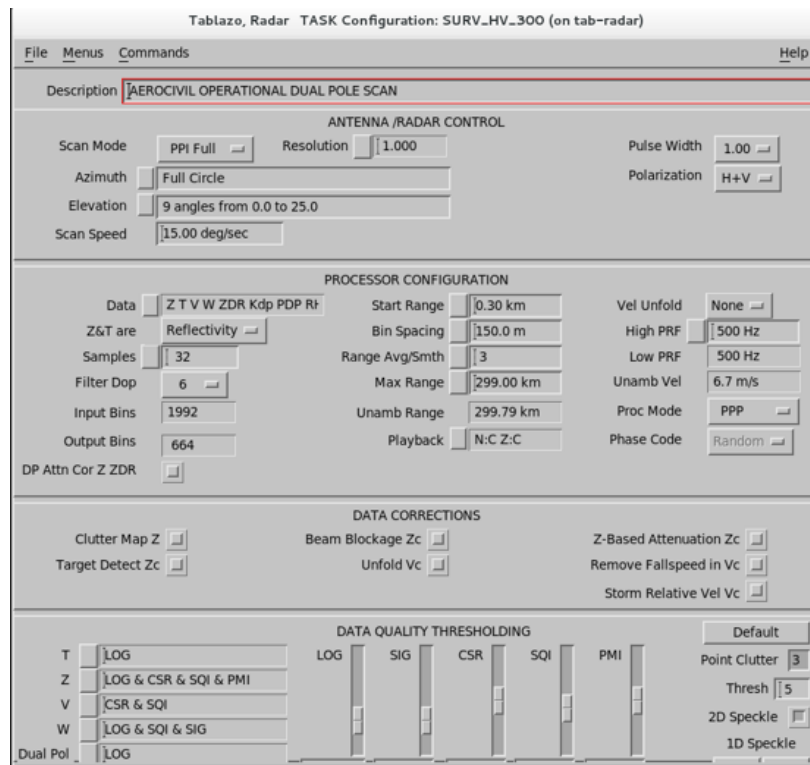


Figura 11. Menú Task Configuration (Elaboración propia)

Los parámetros del radar se dividen en tres grandes grupos como se evidencia en la Figura 11:

Antenna/Radar Control. Configura las operaciones del radar y la antena. Los parámetros de este grupo son:

- *Azimuth:* Es el ángulo que tiene como punto de referencia la orientación magnética Norte. Este ángulo es medido en sentido de rotación de las agujas del reloj alrededor del horizonte de la antena del radar.
- *Elevación:* Es un ángulo vertical que forma la antena del radar cuando asciende o desciende con respecto al pedestal que la sostiene.
- *Modo de escaneo o exploración:* Es la forma en que la antena explora la atmósfera. Existen varios tipos de exploración, los más comunes son la exploración PPI y RHI. En la exploración PPI la antena explora de forma continua en acimut y de forma discreta en elevación. En la exploración RHI, la antena explora de forma continua en elevación y de forma discreta en azimut.
- *Resolución:* La resolución es la separación requerida entre los haces de datos sucesivos en la dirección explorada
- *Velocidad de exploración:* Son los grados por segundo en los que la antena del radar realiza el escaneo
- *Ancho de pulso:* Es la duración del pulso electromagnético que emite la antena del radar

Configuración del procesador. Configura los datos de salida, los rangos y los promedios utilizados por el procesador de señales. Los parámetros de este grupo son:

- *Data*: Define los datos que el procesador de señales envía al almacenamiento para la creación de los archivos de introducción. Estos datos pueden ser:
 - T: Reflectividad total. Es la energía total que se devuelve al radar.
 - Z: Reflectividad. Se encuentra en unidades de dBZ, se usa para calcular la intensidad de precipitación
 - V: Velocidad. Es la velocidad radial promedio de áreas de hidrometeoros.
 - W: Ancho espectral. Sirve para medir la variabilidad de los valores de velocidad Doppler
 - ZDR: Reflectividad diferencial. Es la relación señal a ruido de los canales verticales y horizontales
 - KDP: Fase diferencial específica. Es la tasa de cambio de la diferencia entre los pulsos horizontales y verticales. Entre más alto sea el KDP, significa que la lluvia es más intensa
 - PhiDP: Fase diferencial. Es la diferencia de fase debido a la propagación entre los canales horizontal y vertical.
 - RhoHV: Coeficiente de correlación entre los canales horizontales y verticales. Importante para clasificar el tipo de hidrometeoro.
 - Z_v, Z_E: La combinación de reflectividad entre el canal horizontal y vertical.
 - Te: Combinación de la reflectividad total entre el canal horizontal y vertical.
- *Muestras*: Es el número de pulsos por rayo
- *Start Range*: Especifica el rango más cercano para la toma de datos en la atmósfera.
- *Bin spacing*: Es la resolución en distancia sobre la atmósfera en la que se procesan los datos.
- *Max Range*: Define el rango máximo en horizonte al que se recopilación los datos.
- *PRF*: Es la frecuencia de repetición de pulsos. Define las veces en las que el radar emite energía y las veces que escucha las señales retro dispersadas.
- *Velocidad inequívoca*: Es el mayor alcance al que un pulso transmitido puede viajar de ida y vuelta entre pulsos transmitidos consecutivamente.

Umbral de calidad de datos. Se definen umbrales logarítmicos para asegurar una visualización de productos clara. Reduce la cantidad de ruido que puede aparecer en la captación de datos.

5.2.3. Productos de un radar Meteorológico

Los productos de un radar se definen como la imagen final que es entregada a los usuarios del radar a fin de conocer las condiciones meteorológicas del momento. La creación de un producto se hace a partir de los datos procesados de una tarea. No se pueden obtener productos si en la tarea no se configuraron datos que pueda procesar el procesador de señales del radar. Se pueden crear una gran variedad de productos combinando distintos datos de la tarea del radar. A continuación, se evidenciarán los productos más comunes:

- PPI: Indicador de posición en plano. Es una imagen en pantalla completa que se usa principalmente para fines de vigilancia meteorológica.
- CAPPI: PPI de altitud constante. Es un corte horizontal de una altitud seleccionada, utilizada para vigilancia e identificación de tormentas fuertes.
- HMAX: Producto de altura de intensidad de reflectividad máxima.

- RAIN: Acumulación de lluvia por N horas.
- Tops: Mapa de ecos superiores. Es un mapa de contornos codificado con colores de la parte superior de un nivel de dBZ seleccionado
- VIL: Líquido integrado de forma vertical. Es un mapa con código de color de la profundidad estimada del agua en mililitros que se encuentra en una capa atmosférica.
- VVP: Procesamiento de volumen de la velocidad. Proporciona gráficos de línea o secciones transversales de tiempo contra altura de la velocidad del viento.

5.2.4. Frecuencia y Longitud de Onda

En el estudio y/o análisis de los radares meteorológicos es fundamental conocer las características que tienen las ondas electromagnéticas que estos equipos transmiten, debido a que de estas características condicionan el uso que se le pueda dar al radar. Normalmente, los radares meteorológicos transmiten a frecuencias, que van de 2,7 a 95 GHz, correspondientes a longitudes de onda entre 11,1 cm y 3,2 mm (Rauber y Nesbitt, 2018).

Es importante establecer el rango de frecuencia sobre la cual trabaja el radar (WRM200), y de esta manera identificar cómo y qué tanto afectan las ondas electromagnéticas los siguientes fenómenos:

Refracción. Definido por Rauber y Nesbitt (2018) como “cambio de dirección de propagación de una onda electromagnética que se produce cuando la onda pasa de un medio a otro”. En la Figura 8, se evidencia un ejemplo de refracción para una onda óptica, en el ejemplo se evidencia un pitillo o pajita que parece estar doblado porque la luz se refracta en la interfaz agua/aire. La refracción está gobernada por la ley de Snell (1):

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{v_{c1}}{v_{c2}} \quad (1)$$

donde θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 es el ángulo de refracción, ambos medidos con respecto a la vertical, y v_{c1} y v_{c2} son las velocidades respectivas de la luz en cada capa.

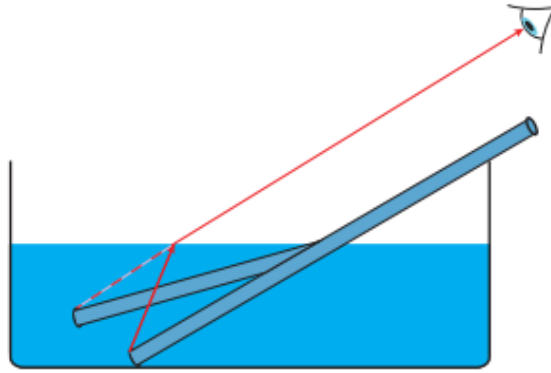


Figura 12. Ejemplo de refracción de la luz en una longitud de onda óptica (Rauber y Nesbitt, 2018)

Reflexión. Es el cambio de dirección de una onda electromagnética en una interfaz entre dos sustancias diferentes. En la Figura 13 se evidencia un ejemplo de reflexión.

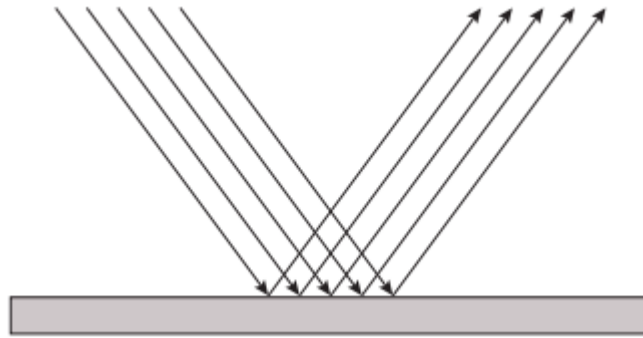


Figura 13. Ejemplo de reflexión de una onda (Rauber y Nesbitt, 2018)

Atenuación. Este fenómeno se produce cuando las ondas electromagnéticas con una frecuencia específica interactúan con partículas de la atmósfera absorbiendo energía electromagnética, lo que deriva en la reducción de potencia de las ondas. En los radares las microondas que transmiten pueden ser absorbidas por gases, hielo y gotas de agua. Según Rauber y Nesbitt (2018) “la cantidad de absorción que se produce es mayor para las longitudes de onda de radar más cortas y menor para las longitudes de onda de radar más largas” (p. 18).

Por los fenómenos mencionados anteriormente, los radares meteorológicos se clasificaron según su banda de frecuencia y longitud de onda que el transmisor emite. De la Tabla 2 a la 4 se puede evidenciar dichas clasificaciones:

Banda S	
Parámetro	Descripción
Frecuencia	Entre 2-4 GHz
Longitud de onda	De 8-15 cm

Cobertura	Rangos $0 < r < 240$ km
Ventajas	No se ven afectados por atenuación
Desventajas	Precio elevado y necesitan de disco de grandes dimensiones

Tabla 2. Parámetros de radar banda S (Universidad Politécnica de Catalunya, s.f.)

<i>Tabla 2. Parámetros de radar banda S (Universidad Politécnica de Catalunya, s.f.)</i> Parámetro	Descripción
Frecuencia	Entre 4-8 GHz
Longitud de onda	De 4-8 cm
Cobertura	Rangos intermedios < 120 km
Ventajas	Portabilidad y precio
Desventajas	Afectados por la atenuación

Tabla 3. Parámetros de radar banda C (Universidad Politecnica de Catalunya, s.f.)

Banda X	
Parámetro	Descripción
Frecuencia	Entre 8-12 GHz
Longitud de onda	De 2.5-4 cm
Cobertura	Rangos intermedios < 60 km
Ventajas	Sensitivos a partículas de pequeño tamaño y portables
Desventajas	Muy afectados por la atenuación

Tabla 4. Parámetros de radar banda X (Universidad Politecnica de Catalunya, s.f.)

Existen más bandas de frecuencias en las que un radar meteorológico podría operar. Sin embargo, las expuestas en las Tablas de la 2 a la 6, son las bandas más comunes en las cuales se clasifican los radares a nivel mundial. Empero, no hay límites en los que un radar puede operar, tal como lo explica Díaz (2005): “cualquier dispositivo que detecte y localice blancos por medio de la radiación electromagnética y utilice el eco devuelto por el blanco puede ser clasificado como un radar, cualquiera que sea la frecuencia utilizada” (p.7). Pero estos dispositivos deben estar en lugares estratégicos para que sus lecturas o detecciones tengan validez. El radar WRM200 se encuentra a una altura aproximada 3450 metros sobre el nivel del mar y su ubicación es ideal para detectar convectividad sobre la sabana de Bogotá y sus proximidades. En la Figura 10 se evidencia el sitio estratégico en el que se encuentra ubicado el radar WRM200.



Figura 14. Ubicación del radar sobre la cumbre del cerro Tablazo (Elaboración propia)

5.2.5. Fundamentos de radiación del radar

El fenómeno de radiación de antena es un fenómeno electromagnético y por ende se rige por las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \cdot E^{\rightarrow} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (2)$$

$$\nabla \times E^{\rightarrow} = -\frac{\partial B^{\rightarrow}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B^{\rightarrow} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{I} + \epsilon_0 \epsilon_r \mu \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (5)$$

Se afirma que (2) la divergencia del campo eléctrico es una función de la densidad de carga, (3) un bucle cerrado de campo eléctrico que existirá cuando el campo magnético cambie con el tiempo, (4) el campo magnético no es divergente y, por tanto, está formado por bucles cerrados y (5) un bucle cerrado de líneas de campo magnético existirá en presencia de una corriente y/o un campo eléctrico variable en el tiempo.

A partir de la introducción básica de las ecuaciones de Maxwell, es claro establecer la radiación que parte de una antena. Hay distintos tipos de antenas, pero para el caso de este proyecto se evidenciará cómo es el proceso de radiación de una antena parabólica, ya que el radar WRM200 opera con un reflector parabólico.

De acuerdo con el ingeniero Arrambí Díaz (2005), el análisis de radiación de una antena parabólica se puede realizar con distintas técnicas, en este caso la técnica realizada es la Óptica geométrica. Esta técnica permite calcular los campos en la apertura y los campos lejanos. A continuación, se evidencia en la Figura 15:

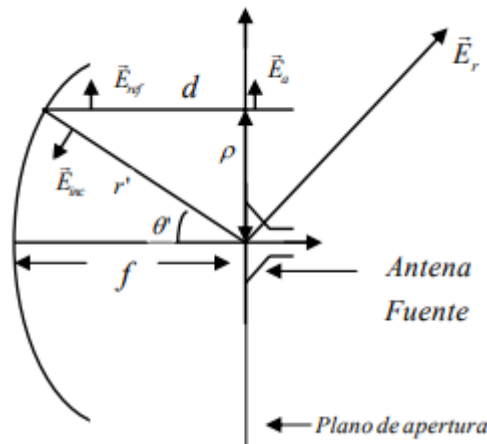


Figura 15. Análisis de los campos en una antena parabólica (Arrambí Díaz, 2005)

Donde:

$$\begin{aligned}\vec{E}_{inc} &= \text{campo incidente} \\ \vec{E}_{ref} &= \text{campo reflejado} \\ \vec{E}_a &= \text{campo apertura} \\ \vec{E}_r &= \text{campo lejano radiado}\end{aligned}$$

Figura 16. Convenciones de los campos (Arrambí Díaz, 2005)

A partir de la figura 15, se puede realizar el análisis de la antena parabólica. La antena radía desde su foco transforma un frente de ondas esféricas que convierte en un frente de ondas plano.

A nivel matemático se determina que r' es el rayo incidente al reflector parabólico radiado por la fuente con un ángulo θ' y d es el rayo reflejado paralelo al eje z . En (6) se evidencia la longitud de trayecto “óptico total desde el foco hasta el plano de apertura” (Arrambí Díaz, 2005):

$$r' + d = 2f \quad (6)$$

$r' + d$ es la suma que representa la longitud de trayecto óptico total, como se mencionaba anteriormente. f es la longitud focal, $d = r' \cos \theta$ por lo que la ecuación (6) se puede escribir como se evidencia en (7):

$$r' + r' \cos \theta = 2f \quad (7)$$

Despejando r' se obtiene (8):

$$r' = \frac{2f}{1 + \cos \theta} \Rightarrow \frac{f}{\cos^2(\theta/2)} \quad (8)$$

La ecuación (8) es la representación polar de la superficie de la antena parabólica. El desplazamiento radial del rayo reflejado sobre el plano de apertura está descrito en (9) (Arrambí Díaz, 2005):

$$\rho = 2f \frac{\text{sen}\theta}{1 + \cos\theta} = 2f \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (9)$$

Para determinar el campo radiado de la antena parabólica se hace la transformada de Fourier del campo de apertura. Así que el campo eléctrico radiado en la dirección definida por θ, Φ se da por (10),(11) (Arrambí Díaz, 2005):

$$E_{\theta} = jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \frac{1 + \cos\theta}{2} [f_x \cos\phi + f_y \text{sen}\phi] \quad (10)$$

$$E_{\phi} = jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \frac{1 + \cos\theta}{2} [f_x \cos\phi + f_y \text{sen}\phi] \quad (11)$$

Donde el vector $f = \hat{x}f_x + \hat{y}f_y$ es la transformada de Fourier dada por (12) (Arrambí Díaz, 2005):

$$f(\theta, \phi) = \int_0^a \int_0^{2\pi} E_a(\rho) e^{jk * r'} \rho d\rho d\hat{\phi} \quad (12)$$

Asumiendo que el campo de apertura es constante y con propósitos de resolver la integral se hace $\phi=0$ y sabiendo que $k * r' = k\rho \text{sen}\theta \cos\hat{\phi}$ y $\underline{E}_a = E_0 a_x$, quedando la integral como se describe en (13) (Arrambí Díaz, 2005):

$$f(\theta) = E_0 a_x \int_0^a \int_0^{2\pi} e^{jk\rho \text{sen}\theta \cos\hat{\phi}} \rho d\rho d\hat{\phi} \quad (13)$$

La integración son resueltas a partir de la representación de las funciones de Bessel $J_0(x)$ y $J_1(x)$ como se evidencia en (14) (Arrambí Díaz, 2005):

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{jxcos\hat{\phi}'} d\hat{\phi} \text{ y } \int_0^1 J_0(xr)rdr = \frac{J_1(x)}{x} \quad (14)$$

Resolviendo (13 se tiene /15)):

$$f(\theta) = 2\pi a^2 E_0 a_x \frac{J_1(kasen\theta)}{kasen\theta} \quad (15)$$

Para (15) $k = 2\pi/\lambda$. La ecuación (15) representa el patrón de radiación de una apertura circular con campo uniforme (Arrambí Díaz, 2005). A continuación, en la figura 16 se muestra el patrón de radiación de la antena de doble polarización del radar WRM200:

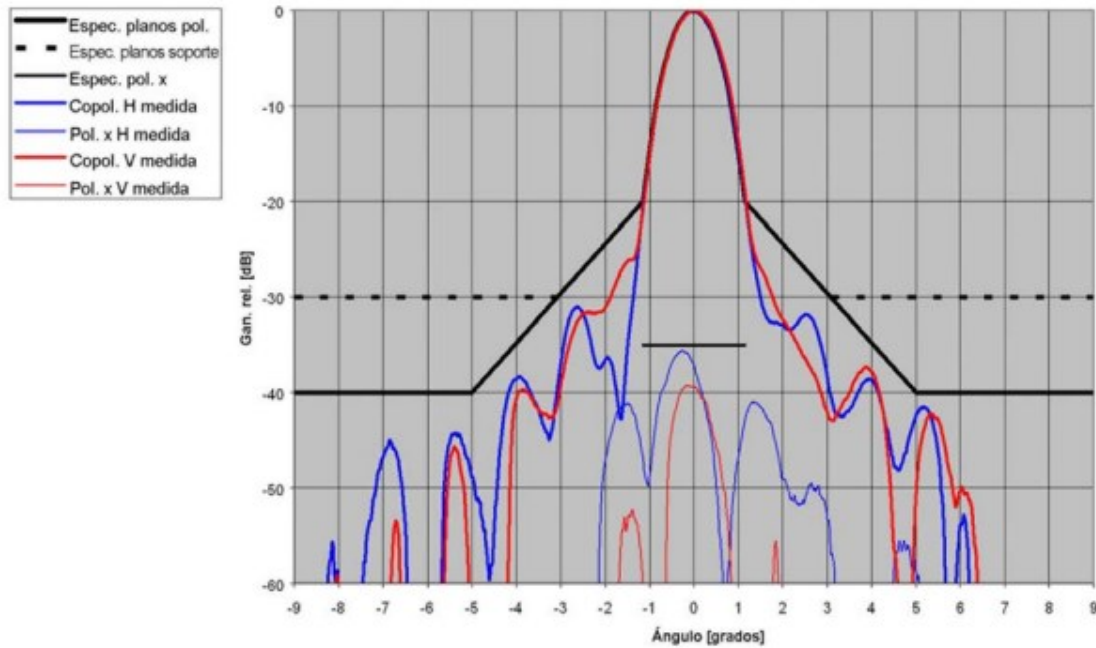


Figura 16. Análisis de los campos en una antena parabólica (Vaisala, 2019, 4)

En el patrón de radiación de una antena de doble polarización, como la del Vaisala WRM200, la antena hace coincidir los patrones de los lóbulos principales horizontal y vertical copolares, lo que permite que el radar tome medidas de doble polarización no contaminadas, tal como datos de ZDR y PhiDP.

La antena del Vaisala forma un rayo simétrico con un ancho de rayo de media potencia de 0,95 grados. Los lóbulos laterales de los planos de polarización caen rápidamente por debajo de los -40dB. El aislamiento de polarización cruzada es mayor a 35 dB.

5.2.6. Ecuación del radar

La propagación de las ondas se da mediante la oscilación de los campos eléctricos y magnéticos. Generalmente cuando se habla de propagación de ondas se refiere a la propagación a través del vacío, sin embargo, si las ondas viajan por la atmósfera también se le considera espacio libre (Catarina, 2022).

Las microondas que emiten los radares se propagarían en línea recta si la atmósfera se tratara de un medio homogéneo, pero la realidad es diferente. Debido a los elementos que la atmósfera contiene y los fenómenos que estos producen (reflectividad, refracción, absorción), además de su estratificación vertical, los haces emitidos por el radar cambian de dirección. La entidad WMO (2018) explica lo que pasa con las ondas, “cuando las ondas encuentran precipitaciones y nubes, parte de la energía es absorbida, parte se dispersa en todas las direcciones, y parte se retrodispersa hacia el radar” (p. 756).

Es importante tener en cuenta la propagación de las ondas del radar, porque un análisis de éstas influye en el tipo de estrategia que se implemente en él. Inclusive, la geometría de la Tierra incide directamente en la propagación de las ondas. De forma generalizada se asume que la Tierra es esférica y debido a la óptica atmosférica, estas ondas se inclinan hacia abajo a un radio de 4/3 de la Tierra (WMO, 2018).

La ecuación del radar permite determinar el desempeño del radar con respecto a las dependencias físicas de la potencia de transmisión y las señales de retorno. En (16) se evidencia la famosa ecuación del radar desde la óptica clásica:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_s G^2 \lambda^2 \sigma}{P_r (4\pi)^3 L_{ges}}} \quad (16)$$

Donde,

Rmax: Rango máximo al que se recibe la potencia mínima de sensibilidad del radar

Ps: Potencia transmitida

λ : Longitud de onda

σ : Sección transversal del radar

G: Ganancia de la antena del radar

Pr: Potencia mínima de recepción del radar en determinado rango

Lges: Sumatoria de las pérdidas en factores internos de atenuación en la ruta de transmisión y recepción, pérdida de fluctuación durante el reflejo y pérdidas atmosféricas por propagación.

Realizando un caso práctico, donde se quiere evaluar la potencia mínima que el radar WRM200 recibe, se puede calcular reescribiendo (16) como se evidencia en (17) (Rauber y Nesbitt, 2018) :

$$Pr = \frac{1}{64\pi^3} [PsG^2\lambda^2] \left[\frac{\sigma}{R^4} \right] \quad (17)$$

El último término entre paréntesis en (17) representa las propiedades del objetivo y muestra que la potencia recibida en el radar disminuye rápidamente a medida que un objetivo aislado se aleja en el rango. Debido a la dependencia de la cuarta potencia, al duplicar el alcance disminuye la potencia recibida en un factor de 16. Las características del objetivo, como la forma y la orientación, influyen en la sección transversal del radar y, por tanto, en la potencia recibida.

Para el equipo radar los tamaños de Ps, G y λ se consideran constantes. En el caso del radar WRM200, Ps= 250 kw, $\lambda = 5.3 \text{ cm}$ ya que la frecuencia de operación del radar es de 5.625 GHz. Para obtener G se usa (18):

$$G = 0.55 \left(\frac{\pi DA}{\lambda} \right) \quad (18)$$

Donde DA= 4.5 mts (Diámetro de la antena).

Se resuelve (18):

$$G = 0.55 \left(\frac{\pi * 4.5 mts}{0.053 mts} \right) = 31622.7 = 45dB \quad (18)$$

Para obtener el valor de potencia recibida por el radar WRM200 del Tablazo, se tiene en cuenta el parámetro de rango de la configuración actual del radar y el valor mínimo de sección transversal del radar, siendo $0.001 m^2$. Este rango está dispuesto a 300 KM. Con este valor, a partir de (17) se puede obtener el valor de potencia recibida por el radar de un único objetivo localizado a 300 Km:

$$Pr = \frac{1}{64\pi^3} [PsG^2\lambda^2] \left[\frac{\sigma}{R^4} \right] = \frac{1}{64\pi^3} [250Kw * (31622.7)^2 * (5.3^{-1}m)^2] \left[\frac{10^{-3}m^2}{(300)^4} \right] \quad (17)$$

$$= 4.36 \times 10^{-16}W$$

Esta cantidad de potencia está muy por debajo del umbral de ruido del WRM200 y el granizo pasaría desapercibido. Afortunadamente, las partículas de precipitación se producen en gran número y no de forma aislada.

Aunque ya se analizó la ecuación clásica de un radar, es necesario llevar esta ecuación a la aplicación de un radar meteorológico. Según Rauber y Nesbitt (2018) “La ecuación del radar meteorológico se basa en dos supuestos críticos sobre la naturaleza de las partículas de precipitación dentro del volumen contribuyente. Primero, las partículas consisten en su totalidad en esferas dieléctricas y segundo, las partículas son lo suficientemente pequeñas en relación con la longitud de onda del radar como para poder utilizar la teoría de dispersión de Rayleigh para describir su comportamiento de dispersión”. Para pasar de la ecuación clásica de radar a la ecuación de radar meteorológico, es necesario tener en cuenta, la ecuación clásica del radar para blancos distribuidos que se muestra en (19) (Rauber y Nesbitt, 2018):

$$Pr = \frac{c}{1024(\ln 2)\pi^2} [PsG^2\lambda^2\tau\phi^2] \left[\frac{\eta}{R^2} \right] \quad (19)$$

La ecuación anterior es la ecuación genérica para un objetivo distribuido (independientemente del tipo de objetos que componen el objetivo). La ecuación indica que la potencia recibida en el radar puede incrementarse aumentando la duración del pulso y/o la anchura del haz, ya que el efecto de cada uno de ellos es que se incluyen más objetos dentro del volumen del pulso.

La otra ecuación que se debe tener en cuenta para obtener la ecuación del radar meteorológico, es la ecuación del factor dieléctrico asociado al factor de reflectividad del radar, como se muestra en (20):

$$\eta = \frac{\sum j\sigma_i}{V_c} = \left[\frac{\pi^5}{\lambda^4}\right] |K|^2 \frac{\sum jD_j^6}{V_c} \quad (20)$$

Donde la $\sum j$ es la cantidad de partículas con diámetro D_j por volumen de unidad en la atmósfera.

Así que la ecuación del radar meteorológico se obtiene sustituyendo (20) en (19), quedando de la manera en la que se muestra en (21):

$$Pr = \frac{\pi^3 c}{1024(\ln 2)} \left[\frac{PsG^2\tau\phi^2}{\lambda^2}\right] \left[\frac{|K|^2 Z}{R^2}\right] \quad (21)$$

Se resuelve para Z en (22):

$$Z = \frac{1024(\ln 2)}{\pi^3 c} \left[\frac{\lambda^2}{PsG^2\tau\phi^2}\right] \left[\frac{R^2 Pr}{|K|^2 Z}\right] \quad (22)$$

La ecuación 22 se denomina ecuación del radar meteorológico. “Relaciona las propiedades del radar (longitud de onda, potencia transmitida, ganancia, duración del pulso y anchura del haz) y propiedades del objetivo (composición, ubicación y potencia de retrodispersión medida) con el factor de reflectividad del radar” (Rauber y Nesbitt, 2018).

La reflectividad, en el caso particular de las mediciones por radar, es cuando las “cosas” en la atmósfera reflejan radiación, el término preciso es retrodispersión. Se mide en Z (factor de reflectividad) y se suele expresar en dBZ.

La ecuación de reflectividad simplificada y partiendo de (22), se puede resolver como se muestra en (23):

$$Z = \frac{PR^2}{LCK} \quad (23)$$

Donde,

P: Potencia promedio medida en vatios de varias muestras del radar

R: Rango hasta el bin

L: Atenuación

C: Constante de radar

K: índice de refracción que depende las propiedades dieléctricas de la partícula

La reflectividad permite determinar, por ejemplo, que una gota con un diámetro de 4mm da 4096 veces más energía que una gota de 1 mm. No permite determinar si hay una gota de 2 mm o 64 de 1 mm (Vaisala, 2019, 4).

Z puede variar entre 0.001 y 10.000.000. Par obtener números entendibles se una una escala de decibeles, como se muestra en (24):

$$dBZ = 10 \log \frac{(Zmm^6mm^{-3})}{(1mm^6mm^{-3})} \quad (24)$$

Las unidades básicas del factor de reflectividad del radar son $m^6/m^3 = m^3$, pero se expresa convencionalmente en unidades de mm^6m^{-3} , siendo los milímetros las dimensiones típicas de las gotas de lluvia y los metros las dimensiones del volumen contributivo. El factor de reflectividad del radar se expresa normalmente en unidades logarítmicas porque puede variar en muchos órdenes de magnitud en la naturaleza. Como un logaritmo requiere un número sin unidades, Z se normaliza en $1 mm^6m^{-3}$, tal como se evidenció en (24) (Rauber y Nesbitt, 2018).

Según Rauber y Nesbitt (2018) “La ecuación del radar meteorológico se derivó a partir de una serie de supuestos sobre la naturaleza de los objetivos y las características del radar que los irradia. Un supuesto clave era que la dispersión de Rayleigh era aplicable; es decir, los elementos de dispersión eran esferas dieléctricas homogéneas con diámetros pequeños en relación con la longitud de onda del radar”. En la Figura 17 se evidencian los objetivos meteorológicos que clasifican en la dispersión de Rayleigh según el tipo de banda de frecuencia del radar:

Hydrometeors Diameter range	Cloud droplets 0.001–0.01 cm	Drizzle drops 0.01–0.05 cm	Raindrops 0.05–0.5 cm	Ice crystals 0.001–0.5 cm	Snowflakes 0.5–5 cm	Graupel 0.1–1 cm	Small hail 1–2 cm	Large hail 2–5 cm	Giant hail >5 cm
S-band (10 cm)	Yes	Yes	Yes	Yes	Mostly	Yes	Yes	Mostly	No
C-band (5 cm)	Yes	Yes	Yes	Yes	Sometimes	Mostly	Sometimes	No	No
X-band (3 cm)	Yes	Yes	Yes	Yes	Sometimes	Sometimes	No	No	No
K-band (1 cm)	Yes	Sometimes	Sometimes	Sometimes	No	Rarely	No	No	No
W-band (0.3 cm)	Yes	Sometimes	No	Sometimes	No	No	No	No	No
Shape	Spheres	Spheres	< 1 mm = spheres > 1 mm = spheroids	Not spherical (exception: frozen drops)	Not Spherical	Spheres and cones	Quasi- spherical	Spherical and other shapes	Spherical and other shapes

Figura 17. Tipos de hidrometeoros en la nube en relación con los criterios de Rayleigh para el tamaño y la forma (Raubert y Nesbitt, 2018)

5.2.4. Redes de Radars Meteorológicos

Las antiguas redes de radares se conectaban a través del protocolo RS232 con MikroC for Pic32 para procesamiento de señales. Este es un entorno de programación para sistemas embebidos que no dependen de un procesador, lo que permite un costo bajo en la operatividad del radar, pero con grandes limitaciones (Ramirez, 2013). Debido a ello, se empezó a usar protocolo TCP/IP para crear la Red de Radars Meteorológico, conectados a través de la nube por medio de servidores, tal como lo hace la Red de radares de la Aerocivil.

En Colombia, existe una red de radares meteorológicos nacional no formalizada desde la óptica administrativa pero sí bien desarrollada desde el punto de vista técnico y operativo. Es decir, existe la infraestructura de telecomunicaciones y acuerdos entre las entidades nacionales para compartir la información que captan cada uno de sus radares, pero aún no existe una dependencia o estructura gubernamental centralizada que normative y/o legisle dicha red. Actualmente, febrero de 2022, esta red nacional de radares permite que se comparta la información de la red interna de radares de cada entidad con otras entidades nacionales. Las entidades que conforman esta red son el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá - Área Metropolitana del Valle de Aburrá (SIATA-AMVA), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil (UAEAC-Aerocivil). En la sección 7.1 se detalla cómo funciona esta red.

5.3. Marco Legal

A continuación, se expondrán las normas Aeronáuticas partiendo de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia (RAC), los cuales “son aplicables de manera general a toda actividad de aeronáutica civil y a toda persona natural o jurídica, nacional o extranjera que las desarrolle; y de manera especial a las desarrolladas dentro del territorio nacional... y de obligatorio cumplimiento” (Aeronáutica Civil, 2019) y las normas de telecomunicaciones promulgadas por entidades nacionales e internacionales que intervienen en este proyecto, destacando las disposiciones para una correcta prestación del servicio meteorológico para la Navegación Aérea en Colombia.

5.3.1. RAC 203 Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea

Capítulo A. Generalidades del servicio meteorológico para la navegación aérea internacional. Por el cual se especifica la documentación del METP requiriendo contar un Manual descriptivo de las disposiciones de equipos y proveedores para el servicio de Meteorología Aeronáutica. Para los fines de este reglamento acoge lo siguiente (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018):

- Acuerdo Regional de Navegación Aérea
- Aeródromo
- Aeródromo de alternativa
- Alcance visual de la pista
- AWOS (Automatic Weather Observation System)
- Boletín Meteorológico
- Red de Telecomunicaciones fijas aeronáuticas

Párrafo 203.030 de RAC 203. Con el cual se regula acuerdo entre proveedor de Servicio meteorológico y los explotadores. Para fines pertinentes del proyecto se cita inciso b (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018): “Que necesite servicio meteorológico, el modo de notificación por parte del explotador al proveedor del servicio meteorológico cuando:

- Se proyecten nuevas rutas o nuevos tipos de operaciones.
- Se tengan que hacer cambios de carácter duradero en las operaciones regulares.
- Se proyecten otros cambios que afecten al suministro del servicio meteorológico.” (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2018)

5.3.2. RAC 210 Telecomunicaciones Aeronáuticas

En el cual se adopta y se incorpora a los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia en Armonización en Desarrollo del Anexo 10 de la OACI. Se especifica en la (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020) de la siguiente manera:

El Anexo 10 del mencionado Convenio de Chicago, denominado “Telecomunicaciones aeronáuticas”, contiene una serie de normas y métodos recomendados internacionales relacionados con las radioayudas para la navegación, los procedimientos de comunicaciones, los sistemas de comunicaciones, el sistema de radar de vigilancia y el sistema anticollisión, y la utilización de radiofrecuencias aeronáuticas, dispuestas en este orden en cada uno de sus cinco volúmenes.

Párrafo 210.052 Sistemas de meteorología aeronáutica. Constituye algo significativo la normativa descrita en los siguientes ítems en el proyecto realizado, pues el radar meteorológico al ser un dispositivo que entrega información no solo a los meteorólogos, sino también a los controladores aéreos de la Región de información de Vuelo Bogotá (FIR Bogotá) quienes son proveedores de servicios de tránsito aéreo, la implementación de mejora al radar la cubre los ítems

descritos en el párrafo 210.052, dicha mejora al radar se rigió con obligatoriedad a no realizar un daño temporal ni absoluto al equipo, no restar la confiabilidad ni certeza de los datos suministrados, mantener el radar siempre disponible y demás condiciones que se exponen a continuación (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020) :

- “Determina que el Proveedor de los servicios de comunicaciones y navegación aérea (CNSP), en este caso la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, deberá asegurar que los equipos para el servicio meteorológico cumplan los niveles de confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad e integridad que garanticen la seguridad operacional.
- El CNSP deberá asegurarse de que los datos extraídos de los sistemas de meteorología aeronáutica sean oportunamente suministrados y presentados a las dependencias del Proveedor de Servicios de Tránsito Aéreo (ATSP) que los requieran
- El CNSP debe garantizar que en todas las dependencias del ATSP donde sean requeridos los datos de información meteorológica, también se cuente con un sistema alternativo que presente por lo menos el mínimo de datos meteorológicos requeridos por el ATSP para prestar su servicio de control de tráfico aéreo con los adecuados niveles de seguridad operacional.” (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020)

Párrafo 210.656 Adjudicación de frecuencias para los servicios aeronáuticos. La CNSP debe tener en cuenta la adjudicación de frecuencias para los servicios aeronáuticos, como se muestra en la siguiente imagen. Para requisitos del proyecto se evidencian aquellos que son de Radars Meteorológicos en la Figura 18.

Banda	Servicio	Utilización aeronáutica
130–535 kHz	SRNA	NDB
2.850–22.000 kHz	SMA(R)	Comunicaciones aeroterrestres (HF voz y datos)
3.023 y 5.680 kHz	SMA(R)	Búsqueda y salvamento
74,8–75,2 MHz	SRNA	Radiobaliza
108–117,975 MHz	SRNA/SMA(R)	Localizador VOR/ILS/ GBAS/VDL Modo 4
117,975–137 MHz	SMA(R)	Comunicaciones aire-tierra y aire-aire (voz y datos en VHF)
121,5, 123,1 y 243 MHz	SMA(R)	Frecuencias de emergencia
328,6–335,4 MHz	SRNA	Radioalineación de descenso ILS
406–406,1 MHz	SMS	Búsqueda y salvamento (ELT)
960–1.164 MHz	SRNA/ SRNS/ SMA(R)	Comunicaciones aeroterrestres/ DME/SSR/ACAS/UAT
1.030 y 1.090 MHz	SRNA	SSR/ACAS/ADS-B
1.164–1 215 MHz	SRNA/ SRNS	DME/GNSS
1.215–1.400 MHz	SRL/ SRNS/ SRNA	GNSS/ Radar primario de vigilancia (PSR)
1.525–1.559 MHz	SMS (s-E)	Comunicaciones por satélite
1.610–1.626,5 MHz	SMA(R)S(s-E, E-s)	Comunicaciones por satélite
1.626,5–1.660,5 MHz	SMS (E-s)	Comunicaciones por satélite
1.559–1.626,5 MHz	SRNA/ SRNS/ SMS	GNSS
2.700–2.900 MHz	SRNA/SRN	Radar meteorológico
2.700–3.300 MHz	SRNA/ SRN/ SRL	Radar primario de vigilancia (PSR)
4.200–4.400 MHz	SRNA/ SMA(R)	Radioaltímetro WAIC
5.000–5.250 MHz	SRNA/ SMA(R)/ SMA(R)S	MLS/instrucciones UAS y comunicación sin carga útil/ comunicación en la superficie del aeropuerto (AeroMACS)
5.350–5.470 MHz	SRNA	Radar meteorológico de a bordo
8.750–8.850 MHz	SRNA/ SRL	Radar Doppler de a bordo
9.000–9.500 MHz	SRNA/ SRN	Radar de aproximación de precisión/radar meteorológico de a bordo/ Equipo de detección en la superficie de los aeropuertos (ASDE)
13,25–13,4 GHz	SRNA	Radar Doppler de a bordo
15,4–15,7 GHz	SRNA/ SRL	ASDE/Otros sistemas
24,25–24,65 GHz	SRN	ASDE
31,8–33,4 GHz	SRN	ASDE/sistema de visión en vuelo mejorada (EFVS) con radar a bordo

Figura 18. Adjudicación de frecuencias de los Servicios Aeronáuticos por parte de MinTIC (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020)

5.3.3. NTC-ISO 14001 Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con orientación para su uso

Esta norma internacional proporciona a las organizaciones un marco de referencia para proteger el medio ambiente y responder a las condiciones ambientales cambiantes. Además, especifica requisitos que permiten que una organización logre los resultados previstos que ha establecido para su sistema de gestión ambiental (ICONTEC, 2015). Define el establecimiento, implementación y mantenimiento de una política ambiental que debe:

- “Ser apropiada al propósito y contexto de la organización, incluida la naturaleza, magnitud e impactos ambientales de sus actividades, productos y servicios.
- Proporcionar un marco de referencia para el establecimiento de los objetivos ambientales;
- Incluir un compromiso para la protección del medio ambiente, incluida la prevención de la contaminación, y otros compromisos específicos pertinentes al contexto de la organización.

- Incluir un compromiso de cumplir con los requisitos legales y otros requisitos;
- Incluir un compromiso de mejora continua del sistema de gestión ambiental para la mejora del desempeño ambiental.” Adoptada por la Aeronáutica Civil, en la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, específicamente con respecto al lugar de emplazamiento del radar y cómo su operación afectaría a las poblaciones aledañas (ICONTEC, 2015)

5.3.4. RAC 203 Resolución #01284 de 2020

Por la cual se adiciona la parte decimosegunda sobre Meteorología Aeronáutica a los RAC. Resuelve al Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea las siguientes funciones:

- “Preparar y obtener pronósticos y otras informaciones pertinentes para los vuelos en ruta.
- Preparar y obtener pronósticos de las condiciones meteorológicas locales.
- Mantener una vigilancia meteorológica continua en la zona de jurisdicción correspondiente.
- Suministrar Exposiciones verbales, información a miembros de tripulaciones, personal de operaciones u otros usuarios.
- Presentar la información meteorológica disponible, difundirla por los medios disponibles de internet o intranet.
- Intercambiar información meteorológica.” (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2020)

Para el proyecto aquí planteado se toman como referencia las observaciones e Informes meteorológicos competentes (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2020):

- **“Inciso 12.4.1.3.** En las estaciones meteorológicas aeronáuticas, los instrumentos meteorológicos deberán instalarse, funcionar y mantenerse de acuerdo con las prácticas y especificaciones internacionales adoptadas por la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea o quien haga sus veces.
- **Inciso 12.4.1.4.** La Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea o quien haga sus veces, deberá tomar las medidas necesarias para que las estaciones meteorológicas sean inspeccionadas con la frecuencia suficiente, para asegurar una observación de un alto grado de calidad en el servicio y en sus equipos.” (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2020)

RAC 12:Res. 3969 inciso 12.11. Necesidades y Utilización de las comunicaciones

Con la implementación de la mejora operativa fue necesario que la nueva información que estaba siendo captada por el radar fuera compartida al público en general y a las demás regionales de la Aerocivil en el país como lo determina el RAC 12. Por ende, además de hacer la implementación de mejora en el radar, fue necesario que dicha información meteorológica se distribuyera a través de los medios pertinentes como lo son, el software de visualización del radar, IRIS Focus, al que tienen posibilidad de acceder el Grupo de pronosticadores meteorológicos de la

Aerocivil y la Coordinación de Sistemas para Meteorología Aeronáutica. En cuanto al público en general, la información radar puede ser visualizada a través de la página oficial de la Aeronáutica Civil en la sección de Meteorología.

El RAC 12 exige que:

- “La Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, o quien haga sus veces, proveerá los medios y el servicio de transmisión de datos entre las dependencias meteorológicas, de estas con los servicios de tránsito aéreo y con los Centros Meteorológicos Regionales.
- La Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea o quien haga sus veces, establecerá los medios para que la información de meteorología aeronáutica fluya internacionalmente en cumplimiento del plan de navegación aérea y el FASID.” (Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil, 2020)

5.3.5. Anexo 10- Volumen V OACI-Telecomunicaciones aeronáuticas

En este anexo se especifica la utilización del espectro radioeléctrico en el uso aeronáutico Internacional. En relevancia con este proyecto se resalta el Capítulo cuatro, en el cual se evidencia la adjudicación de frecuencias mayores a 30 MHz, incluyendo especificaciones para la navegación aérea en el apartado 4.1.5, que define el método de operación para cualquier dispositivo de comunicación tierra aire (Organización de Aviación Civil Internacional, 2013).

5.3.6. Anexo 10- Volumen III OACI-Sistemas de comunicaciones

En lo que concierne a los Sistemas de comunicaciones para servicios meteorológicos, define los niveles de prioridad operacional para aeronaves, los requisitos de Universal Access Transceiver (UAT) y la red común de intercambio de datos. Para el año 2007, la OACI define el protocolo de transporte de comunicación como una red conmutada de paquetes X.25, de manera que se brinde a través de esta red de transporte el servicio de “información meteorológica relativa a las operaciones (OPMET)” (Organización de Aviación Civil Internacional, 2007). Para la transmisión de datos Meteorológicos define lo siguiente:

“Mensaje radiodifundido por estaciones terrestres, dentro del segmento terrestre de la trama UAT, para transmitir información de vuelo tal como datos meteorológicos en texto y en gráficos, avisos y otra información aeronáutica, a las aeronaves que se encuentran en el volumen de servicio de la estación terrestre.” (Organización de Aviación Civil Internacional, 2007)

5.3.7. Anexo 3- OACI-Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional

En este anexo se identifican los aspectos técnicos y operacionales de la aviación civil (SARPS) en el estudio de la identificación de los servicios meteorológicos aéreos y terrestres. En cuanto a los servicios meteorológicos terrestres, dispone de normativa para radares como centros de avisos de cenizas volcánicas (VAAC), “ Todo Estado contratante que haya aceptado, por acuerdo regional de navegación aérea, la responsabilidad de proporcionar un VAAC dentro del marco de la

vigilancia de los volcanes en las aerovías internacionales, tomará las disposiciones necesarias para que tal centro responda a una notificación de erupción o erupción prevista de un volcán o presencia de cenizas volcánicas en su zona de responsabilidad, encargándose de que dicho centro tenga la siguiente responsabilidad”:

“Vigilar los datos de los satélites geoestacionarios y en órbita polar pertinentes con el objeto de detectar la existencia y extensión de las cenizas volcánicas en la atmósfera en el área en cuestión.” (OACI, 2016)

En la anterior cita se hace la aclaración que los datos terrestres son proporcionados por radares meteorológicos “Doppler, ceilómetros, lídars y sensores infrarrojos pasivos” (OACI, 2016).

Los VAAC por ende, pueden ser apoyados por los radares meteorológicos que tengan la capacidad de detectar ceniza volcánica en la atmósfera, como es el caso del Radar WRM200 del Tablazo.

6. Metodología

La forma en la que se llevó a cabo el proyecto se describe en el diagrama presentado en la Figura 19.

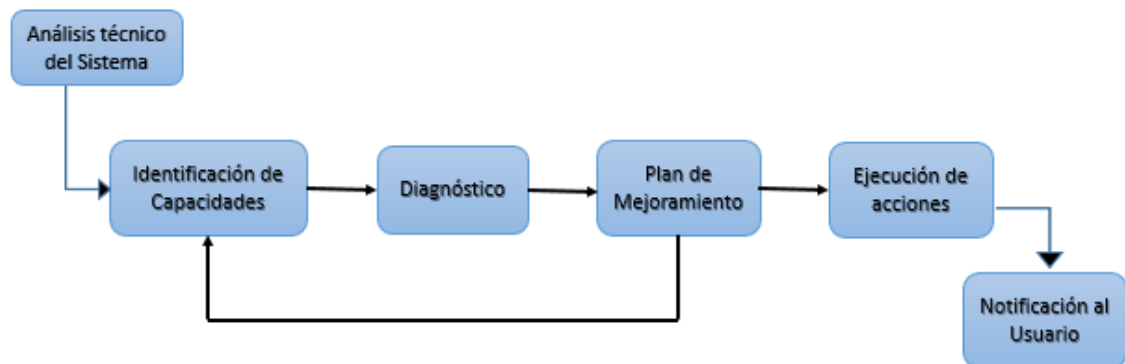


Figura 19. Diagrama de bloque metodología (Elaboración propia)

A continuación, se describe cada uno de los bloques del anterior diagrama que permitieron llegar a la obtención de los resultados del proyecto.

Análisis técnico del Sistema. Se realizó un proceso de aprendizaje teórico mediante la consulta de 8 manuales digitales y 2 manuales físicos de usuario para el Radar Vaisala WRM200, propiedad de la Aeronáutica Civil y proporcionados por la empresa Vaisala. A continuación, se nombran los 8 manuales digitales:

- Guía de usuario de Radar Meteorológico Vaisal WRM200
- Manual de instalación de Radar Meteorológico WRM200
- Manual de mantenimiento del Radar Meteorológico WRM200
- Manual de instalación del software IRIS
- Manual de utilidades/RDA
- Manual del producto y la pantalla de IRIS
- Manual del radar IRIS
- Manual del usuario del procesador de señales y receptor digital RVP900

A continuación, se nombran los manuales físicos:

- Capacitación sobre el mantenimiento del hardware WRM200
- Capacitación del operador del sistema Radar Meteorológico

A partir de estos manuales se logró conocer la ficha técnica, modo de operación, establecimiento de conectividad con la Red de Radares Meteorológicos, notas de aplicación y brochure. Además, se fortalecieron estos aspectos técnicos con la ayuda de profesionales en el área de telecomunicaciones, con el fin de abordar y reforzar los conceptos necesarios para que se realizara un buen proceso en la intervención del radar.

Identificación de capacidades. Se adquirió información del estado técnico, eléctrico, de seguridad y operativo en que se encontraba funcionando el radar, de tal manera que de forma

práctica se pudiera determinar las capacidades que estaban en uso. Toda intervención, manipulación y datos obtenidos fueron registrados para tener un debido control en todo el proceso.

Diagnóstico. Se analizaron los datos obtenidos en la identificación de capacidades para verificar la posibilidad de realizar una mejora operativa al radar, teniendo en cuenta el estado actual y las limitaciones de este, a fin de seleccionar la(s) tarea(s) técnica(s) a explotar.

Plan de Mejoramiento. Se generó un plan y guía de intervención en el que se establecieron los parámetros a mejorar y el protocolo para efectuar la respectiva configuración operativa al radar.

Ejecución de acciones. En esta etapa se realizó de forma directa en el Vaisala WRM200 los debidos ajustes para la configuración de mejora operativa del radar, siguiendo la planeación previamente elaborada.

Notificación al usuario. Finalmente se generó un reporte de toda la intervención realizada en el radar, con las respectivas pruebas de funcionamiento y la demostración tangible del beneficio que dicha intervención trae al Servicio Meteorológico Aeronáutico de la Aerocivil. (Formato)

De forma específica, el desarrollo de este proyecto se realizó en tres fases principales, las cuales llevaron una consecución de actividades para lograr los objetivos propuestos, tal y como se evidencia a continuación.

6.1. Fase I: Búsqueda de Información Técnica en Medios Web

Esta fue la fase investigativa, pues se establecieron los conceptos necesarios para la buena realización del proyecto. Aquí se recolectó la información relevante a partir de documentación (manuales) y ciertos criterios de indagación con profesionales aptos en el campo de las telecomunicaciones. Por lo anterior, el desarrollo de esta fase fue enfocado en las actividades que se enuncian a continuación y que garantizaron el cumplimiento del objetivo “Realizar un análisis técnico del sistema de telecomunicaciones de la Red de radares meteorológicos de la Aeronáutica Civil y de su integración con el Sistema Nacional de Radares”:

- Se indagó sobre documentación técnica de la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, enfocada a los servicios MET de la Aerocivil con el fin de conocer de forma amplia y generalizada el funcionamiento e importancia de los equipos meteorológicos dentro de la industria aeronáutica.
- Se realizó la búsqueda de documentación técnica sobre radares MET de otras Entidades Nacionales, específicamente IDEAM y AMVA. Esta búsqueda fue necesaria para entender con qué equipos estaban trabajando esas entidades para lograr la conformación de la Red de radares MET a nivel nacional.
- Se investigó acerca de la OACI y sus anexos relacionados a los aspectos técnicos que son orientados a los Radares Meteorológicos. Dicha investigación fue importante para saber las limitaciones legales y prácticas que tienen los radares meteorológicos en el entorno aéreo.
- Se hicieron entrevistas al personal de la Aerocivil e IDEAM para comprender en qué consistía la integración de la Red Nacional de Radares Meteorológicos, cuáles eran limitaciones actuales y su programación a corto y mediano plazo.

6.2. Fase II: Análisis Técnico-Operativo del Vaisala WRM200

Esta fase permitió establecer las características más importantes sobre las que se desarrolló el proyecto, identificando las tareas de interés. Para su desarrollo se concibieron las siguientes actividades para el cumplimiento del objetivo “Identificar las capacidades de operación del radar meteorológico marca Vaisala de la referencia WRM200 de acuerdo con su manual técnico, que permita establecer las tareas técnicas que este equipo puede realizar y seleccionar la más adecuada para la propuesta de mejora operativa del Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia”.

- Se estudiaron los manuales técnicos del radar Meteorológico Vaisala WRM200. Se inició con un manual de capacitación de software subdividido en diferentes tomos enfocados a la operación del sistema. Posteriormente, se estudió el manual de capacitación de Hardware enfocado a la estructura tangible del radar. A partir de estos dos manuales se investigó en los 8 manuales digitales, todos estos manuales fueron importantes para familiarizarse con el radar en términos de funcionalidad, capacidades y competencias en el mercado de las telecomunicaciones.
- Se realizó una visita constante al Centro de Gestión Aeronáutico de Colombia de la Aerocivil (CGAC), debido a que en esta dependencia se encuentra ubicado el servidor principal del Radar Meteorológico del Tablazo y además se recibe la información de los demás radares del territorio nacional. En este lugar se realizó el reconocimiento del Data center donde se ubican los servidores del radar, como se evidencia en las Figuras 20 y 21.

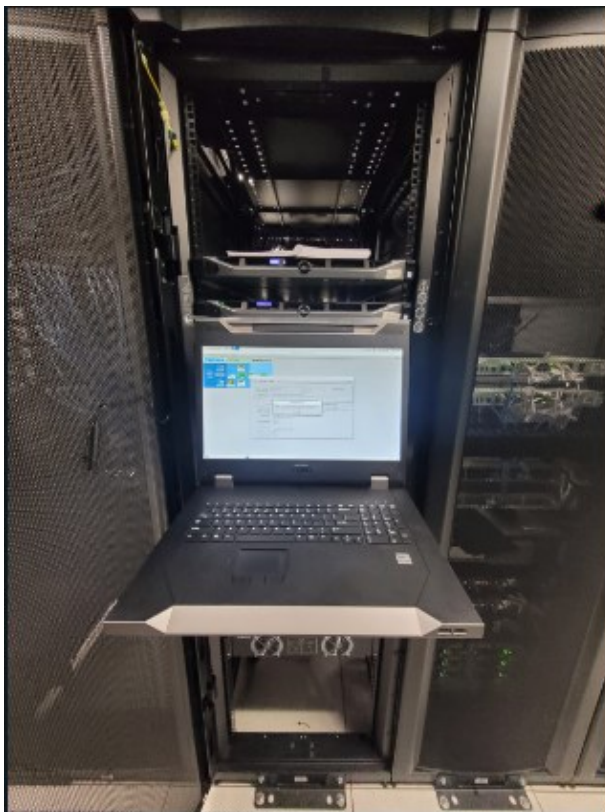
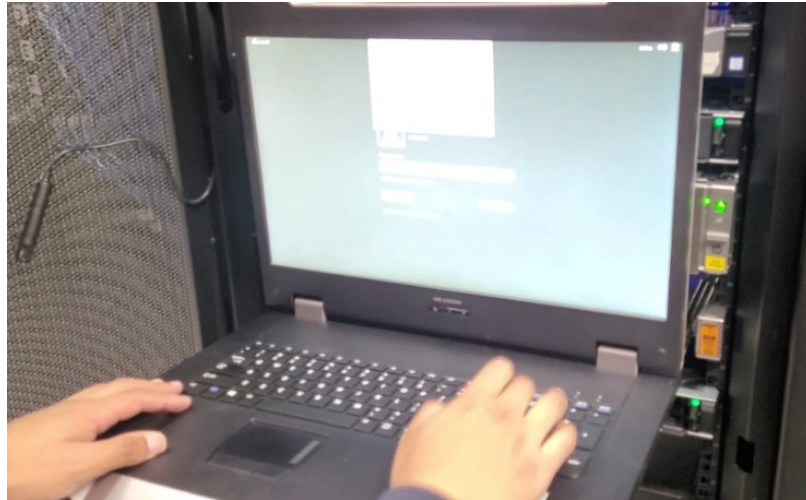


Figura 20. RAC del servidor radares en el CGAC (Elaboración propia)



*Figura 21. Reconocimiento del servidor del CGAC a través de Key Visual Mouse (KVM).
(Elaboración propia)*

- Se hizo una visita técnica al Tablazo-Subachoque (Cundinamarca), lugar donde se encuentra instalado el radar meteorológico. Esta visita se hizo para verificar conexiones del hardware, constatar su funcionamiento y ajustar el indicador de visualización del radar como se muestra en las Figuras 22, 23 y 24.



Figura 22. Realización de evaluación del Radar WRM200 sector Tablazo (Elaboración propia)



Figura 23. Realizando diagnóstico del radar WRM200 Sector Tablazo (Elaboración propia)



Figura 24. Reconocimiento del radomo de la antena del radar WRM200 (Elaboración propia)

- Se identificó la tarea técnica que controla el funcionamiento del radar a partir de los servidores ubicados en el CGAC. Allí se accedió al servidor principal y se evaluó a través de comandos Unix la tarea de exploración volumétrica que estaba operando el radar, la cual tiene como nombre SURV_HV_300, y los productos que estaban siendo entregados a los meteorólogos aeronáuticos y a las entidades como IDEAM y AMVA -SIATA. En la Figura 25 se evidencia el producto volumétrico de la tarea y en la sección 7.3.1 se muestran las características con las que contaba la tarea SURV_HV_300, tarea que fue reemplazada con una nueva estrategia de operación:

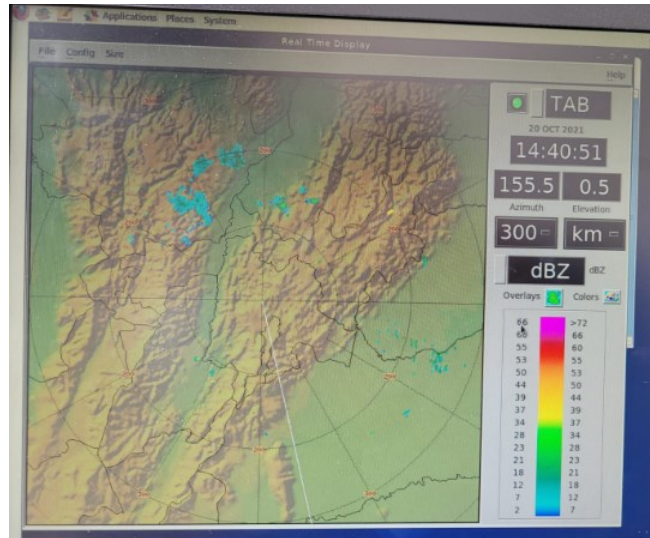


Figura 25. Producto de radar desde servidor Main del CGAC (Elaboración propia)

- Se identificó y analizó el software sobre el que trabaja el radar con el propósito de determinar las posibilidades de optimización del rendimiento y modo de exploración del radar. A continuación, en la Figura 26 se evidencia la interfaz de software, a la cual se accedió desde el servidor Main del CGAC:

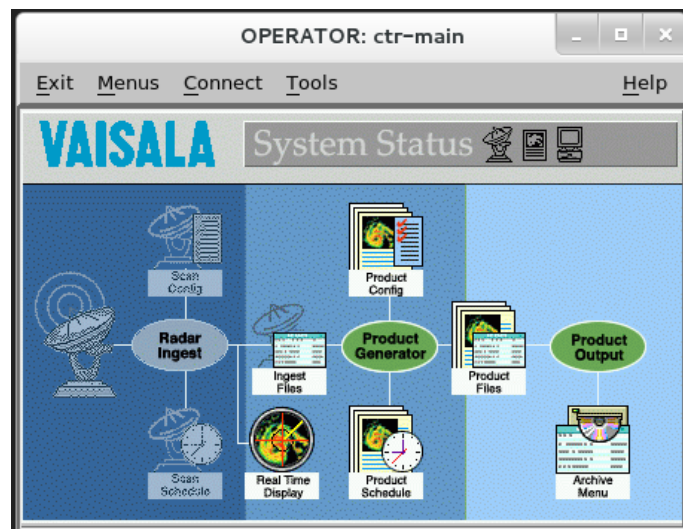


Figura 26. Interfaz software de control del radar (Elaboración propia)

- Se seleccionó la tarea más adecuada para la propuesta de mejora operativa del radar, a partir de los requerimientos que el jefe del grupo de Meteorología Aeronáutica solicitó. Esta tarea se le denominó AERO_JAC y está subdividida en 3 bloques que responden a las necesidades de exploración atmosférica tropical. Las características de esta nueva tarea se evidencian en la sección 7.3.1. Para seleccionar dicha tarea, además de revisar las capacidades y limitaciones del radar, se hicieron diferentes entrevistas a los funcionarios pertenecientes al Centro Nacional de Análisis y pronósticos de la Aerocivil (CNAP), con el

fin de conocer las falencias que ellos, al ser expertos en la interpretación de imágenes de radar meteorológico, podían identificar en el Vaisala WRM200.

6.3. Fase III: Planteamiento de la Mejora Operativa

En esta fase se realizó el desarrollo experimental de los análisis hechos en las anteriores fases, con el fin de plantear la propuesta de mejora operativa, dando así el cumplimiento al objetivo “A partir de la identificación de los productos que genera el radar y las tareas técnicas que realiza, elaborar la propuesta de mejora operativa teniendo en cuenta el producto seleccionado, su utilidad y aplicabilidad en el Servicio Meteorológico Aeronáutico en Colombia”. Para lo anterior se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se realizó un diagnóstico de la operatividad actual del Vaisala WRM200, tanto en software como en Hardware, a partir de los hallazgos obtenidos en la Fase II. De esta manera, se listaron las afectaciones del equipo la lista a continuación es ampliada en la sección 7.3.1:
 - El radar no tiene un objetivo claro para su funcionamiento en meteorología Aeronáutica, hidrología o climatología
 - Rendimiento subutilizado por configuración actual de su tarea (SURV_HV_300)
 - Procesos sobrantes que ocupan capacidad en red y en software. Estos procesos se especifican en la sección 7.3.1.
 - No hay criterio para la resolución espacial en la configuración actual de la tarea del radar
- Se intervino el radar para implementar la tarea seleccionada en la fase dos (AERO_JAC). Dicha intervención se hizo en el servidor principal o Main del radar ubicado en el Data center del CGAC. En la Figura 27 se evidencia el Data center donde se encuentra el RAC respectivo del radar, mientras que en la Figura 28 se muestran los tres servidores con los que trabaja el radar. La Figura 29 muestra el acceso a la configuración de tarea desde el software de control del radar:



Figura 27. Data center CGAC (Elaboración propia)



Figura 28. Servidores (Web, Backup y Main) de los radares Aerocivil (Elaboración propia)

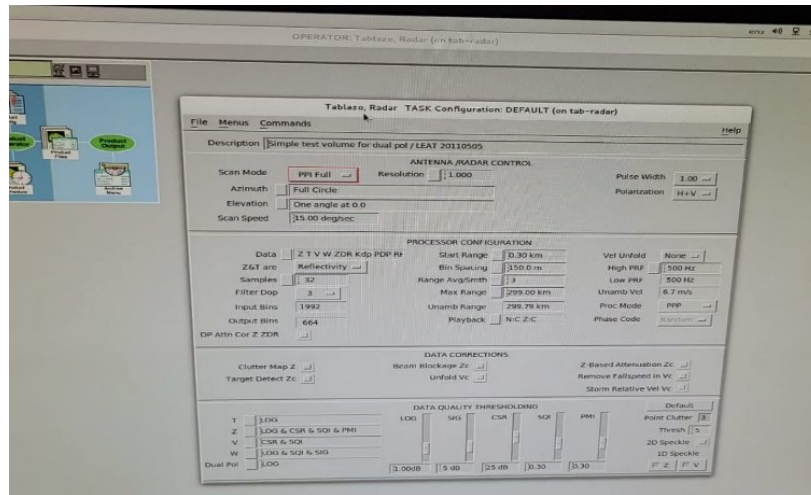


Figura 29. Interfaz de configuración de tareas del radar WRM200 (Elaboración propia)

- Se comparó el rendimiento de la tarea antigua (SURV_HV_300) con respecto a la tarea recién implementada (AERO_JAC), con el fin de analizar los resultados de la intervención realizada. Esta comparación se describe en la sección 7.3.1
- Se compartió el resultado de la mejora realizada en el radar con el Coordinador del Grupo de Sistemas de Meteorología Aeronáutica, con el director de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, con los funcionarios del CNAP y con el grupo técnico de radares meteorológicos del IDEAM, a fin de informar la aplicabilidad de la mejora y su utilidad en el Servicio Meteorológico de la Aerocivil. El resultado se encuentra detallado en la sección 7.3.2.

7. Desarrollo y Resultados

En este capítulo se evidenciará, a través de las siguientes 3 subsecciones, los resultados que se obtuvieron en las 3 fases presentadas en la Metodología. Inicialmente se hablará sobre el diagnóstico realizado a la SNMRC, donde se evidencia la intención de crear una red nacional entre las tres entidades del país que poseen radares meteorológicos. En la siguiente subsección se encontrará una explicación del funcionamiento y operación del radar intervenido para su mejora operativa, el WRM200 de Vaisala. En la última subsección se evidencia cómo se realizó la mejora operativa al radar con la creación de una nueva estrategia de exploración denominada AERO_JAC, la cuál reemplaza a la antigua estrategia que tenía el radar denominada SURV_HV_300.

7.1. Diagnóstico del Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Colombia (SNMRC)

Para establecer cómo se encuentra el SNMRC fue importante investigar por qué para Colombia era importante una integración de radares meteorológicos, además de hacer cuestionamientos acerca de quiénes eran las entidades que conforman dicha red y el papel que la Aerocivil juega dentro de esta. Por ello, tal cómo se especificó en la Fase I de metodología, se hizo una búsqueda de documentación que permitiera dar respuesta a estas interrogantes. Parte de los resultados que se obtuvieron a partir de esta investigación se evidencian en la Figura 30, la cual presenta la estructura general de la Aerocivil, así como el lugar en que se encuentra el servicio meteorológico dentro de esta entidad. De este modo, dicho conocimiento permitió dar el punto de partida hacia las razones por la que fue necesaria la conformación de la SNMRC:

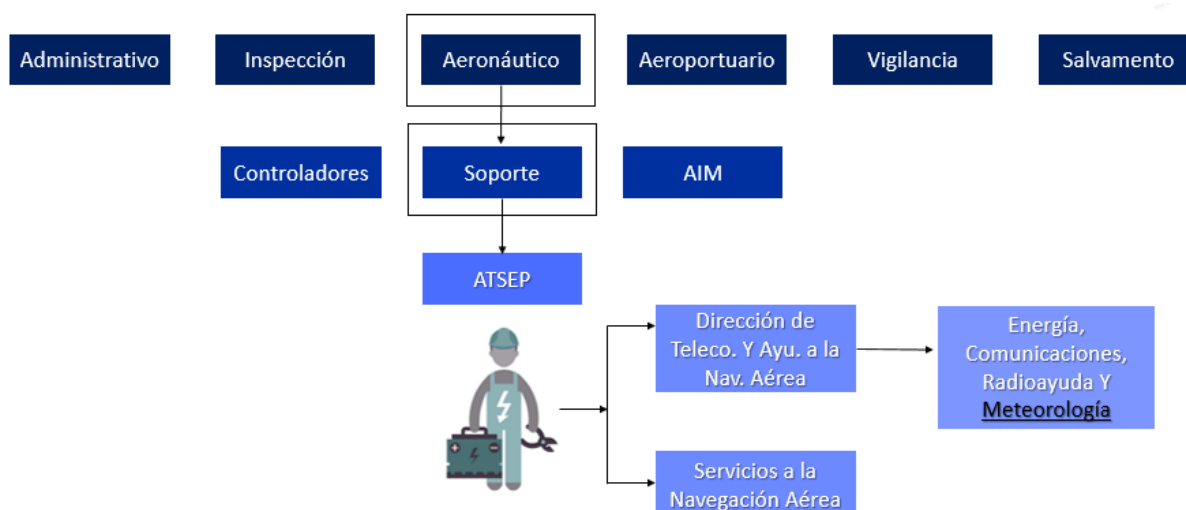


Figura 30. Diagrama de la estructura operacional de la Aerocivil (Elaboración propia)

Dicho diagrama es el resultado que se obtuvo de acuerdo con la investigación realizada de los documentos de la Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación Aérea, y de los Servicios Meteorológicos, específicamente RAC210 (Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, 2020) y Organigrama Aerocivil (UAEAC, 2020). En el diagrama se evidencia que los servicios de soporte de Meteorología son dependencia de la Dirección de

Telecomunicaciones, la cual está conformada por profesionales Ingenieros, Tecnólogos y Técnicos de la rama Air Traffic Safety Electronics Personnel (ATSEP), quienes proveen los servicios de soporte para equipos aeronáuticos, en este caso para los equipos de Meteorología.

La función del Servicio de Meteorología que identificó dentro de la Aerocivil y que va en consonancia con lo estipulado en el Anexo 3 de la OACI (OACI, 2018) es el de proporcionar pronósticos y alertas tempranas a las aeronaves del territorio colombiano, y la herramienta principal para brindar tal información en poco tiempo es el radar meteorológico. Sin embargo, de acuerdo con las entrevistas y conferencias realizadas con el IDEAM, se encontró que para que exista mayor fiabilidad en los datos de radar es necesario tener varios equipos distribuidos por el territorio colombiano, y que la forma ideal de hacerlo es compartiendo la información de los radares pertenecientes a las otras entidades del país tales como el SIATA-AMVA, IDEAM y Aerocivil. De esta manera es factible cubrir el territorio nacional sin recargar a una única entidad la compra de varios radares. Así que, a raíz de la investigación, se hallaron las razones para crear una red nacional de radares, las cuales se mencionan a continuación:

- Se apoya de forma efectiva el suministro de información meteorológica a nivel nacional.
- Se reduce el gasto económico de las Entidades por costos de instalación, mantenimiento y reparación de radares.
- Se genera un punto clave o de referencia en el continente para la detección de adversidades meteorológicas.

Al hacer una evaluación de la documentación de la Coordinación de Sistemas de Meteorología Aeronáutica, y la elaboración de la mejora operativa en el radar del Tablazo, se motivó para que se siguieran elaborando mesas de trabajo que terminaran de consolidar la red de radares que previamente estas tres entidades (Aerocivil, IDEAM y SIATA-AMVA) habían llevado a cabo por medio de convenios, documentos que se encuentran en la sección de Anexos. A continuación, en la Figura 31 se evidencia la cobertura de la red de radares nacional:



Figura 31. Radares meteorológicos de Colombia (IDEAM, 2019)

A partir de la Figura 31, se realizó un diagnóstico del estado de operatividad de los radares en el territorio colombiano, el resultado del diagnóstico se evidencia en la Tabla 5.

Entidad	Radar	Estado
Aerocivil	Tablazo	Operativo
Aerocivil	San Andrés	Inactivo/Mantenimiento
Aerocivil	Corozal	Operativo
Aerocivil	Pasto	En Prueba
IDEAM	Barrancabermeja	Operativo
IDEAM	Cerro Munchique	Operativo
IDEAM	Carimagua	Inactivo/Mantenimiento
IDEAM	S.J. Guaviare	Operativo
SIATA	Santa Elena	Operativo

Tabla 5. Estado de los radares MET en Colombia (Elaboración propia)

Conforme a los datos de la Tabla 5, se evidenció que todos los radares están en capacidad operativa, ya que los que actualmente (febrero 2022) están inactivos se debe a que se encuentran en mantenimientos correctivos, lo cual no estipula una gran demora para su puesta en marcha nuevamente.

En la consulta realizada a los acuerdos que estas entidades tienen entre sí se identificó un compartimiento de información meteorológica en crudo que capta cada radar. Esta información en crudo es un compendio de archivos en formato .RAW, este formato comprime los datos del radar

y los organiza en matrices numéricas que el radar es capaz de interpretar y convertirlo en imágenes que el usuario (meteorólogo) lo pueda interpretar. Para que sea posible este intercambio de datos se halló desde documentación de Aerocivil el siguiente esquema de comunicación entre entidades evidenciado en la Figura 32.

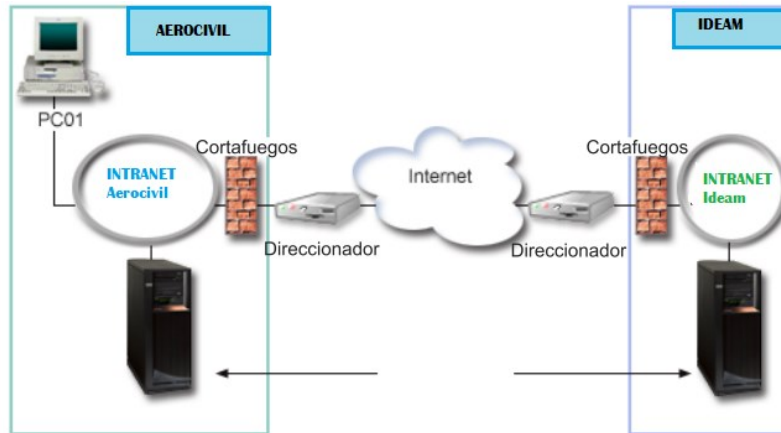


Figura 32. Conexión de VPN bidireccional Aerocivil e IDEAM (IBM, 2000)

El esquema de conexión que se muestra en la Figura 25 es la forma en la que la Aerocivil comparte información con otras entidades. Consiste en una VPN bidireccional desde la cual las entidades tienen acceso al servidor de la otra compañía para tomar los datos recolectados de los radares.

Para la Red de Aerocivil su sistema tiene una IP asociada a la red informática o privada de la Entidad. La Aerocivil realiza negociaciones IKE y aplica IPsec a los datagramas IP entrantes y salientes y, asimismo, es el origen y destino de los datos que fluyen por la VPN. En el caso del sistema de IDEAM, es un espejo de lo que sucede en Aerocivil, y ambas redes pueden iniciar la conexión entre sí. “Es necesario que para iniciar la configuración de la VPN el direccionamiento de TCP/IP sea el correcto para asegurar que los sistemas de ambas pasarelas pueden comunicarse entre sí a través de Internet” (IBM, 2000).

La ventaja de que las entidades cuenten con una VPN es que resulta ser un sistema a bajo costo, de alta seguridad y eficiencia. Sin embargo, según se evidenció desde Aerocivil, es un sistema de baja redundancia, debido a una falta de direccionamiento a un segundo servidor que haga las veces de Backup.

Si bien se encontró la necesidad de la creación del SNMRC y se evidencia que se tiene infraestructura operante tanto en equipos radar como de redes de conexión, en Colombia aún no hay un Sistema Nacional de Radares constituido administrativamente. Todavía es necesario aunar esfuerzos de tipo organizacional entre cada entidad para que se lleve a cabo tal desarrollo; falta la creación de un organigrama estable que permita la definición de políticas.

7.2. Funcionamiento y Operatividad del Radar Meteorológico WRM200

De acuerdo con las lecturas realizadas sobre manuales técnicos y textos sobre capacitación sobre radar meteorológico, se encontró que este radar es de doble polarización, es decir, el modo de dirección de la energía del transmisor pueden ser ondas electromagnéticas polarizadas horizontal y verticalmente, como se muestra en la Figura 33.

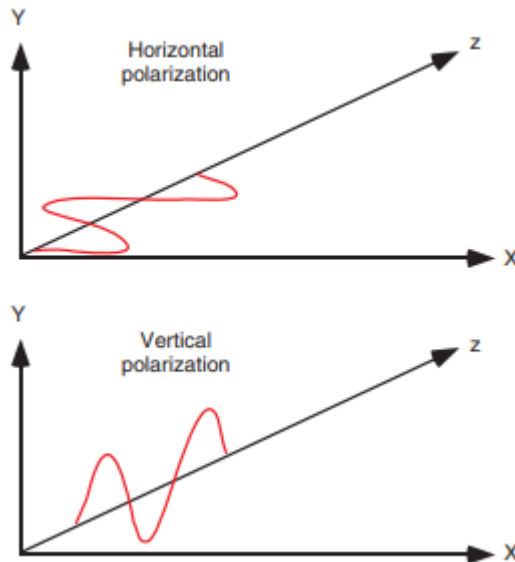


Figura 33. Polarización vertical y horizontal de una onda electromagnética (Rauber y Nesbitt, 2018)

En el caso del WRM200, se halló que tiene la capacidad de trabajar en cualquiera de estos modos:

- **Modo solo horizontal.** La polarización de las ondas electromagnéticas será únicamente de forma horizontal.
- **Modo STAR.** Las ondas electromagnéticas son polarizadas simultáneamente de forma vertical y horizontal.

El radar, al contar con un modo de doble polarización, puede ser más preciso en la captura de objetivos meteorológicos o no meteorológicos, ya que brinda información de la forma del blanco, la distancia y la velocidad en la que se mueve en la atmósfera. Además de ello, en la investigación se evidenciaron las siguientes especificaciones con las que cuenta el radar, que están descritas en la Tabla 6.

Componente	Descripción
Transmisor	<ul style="list-style-type: none"> a. Frecuencia del magnetrón Aerocivil: 5.625 GHz b. Potencia: 250 KW c. Modulador: Estado sólido d. FRP: de 50 a 2400 Hz
Antena	<ul style="list-style-type: none"> e. Tipo: Reflector Parabólico f. Diámetro: 4.5 metros g. Ancho de haz < 1.0
Pedestal	<ul style="list-style-type: none"> h. Tipo: Semiyugo y de elevación sobre acimut i. Rango de ángulos de elevación: -2° a 108°
Procesamiento de señales	<ul style="list-style-type: none"> j. Tipo: RVP900 k. Acimut promedio: 2 a 1024 pulsos l. Salida de datos: 8 y 16 bits

Tabla 6. Especificaciones técnicas generales del WRM200 (Elaboración propia)

El radar del Tablazo está elevado sobre una torre de 18 metros de altura, en la cual se encuentra alojado un gabinete con el hardware de funcionamiento. En la Figura 34 se evidencia el diagrama general del radar. En las Figuras 35 y 36 se evidencia la estructura real del radar meteorológico.

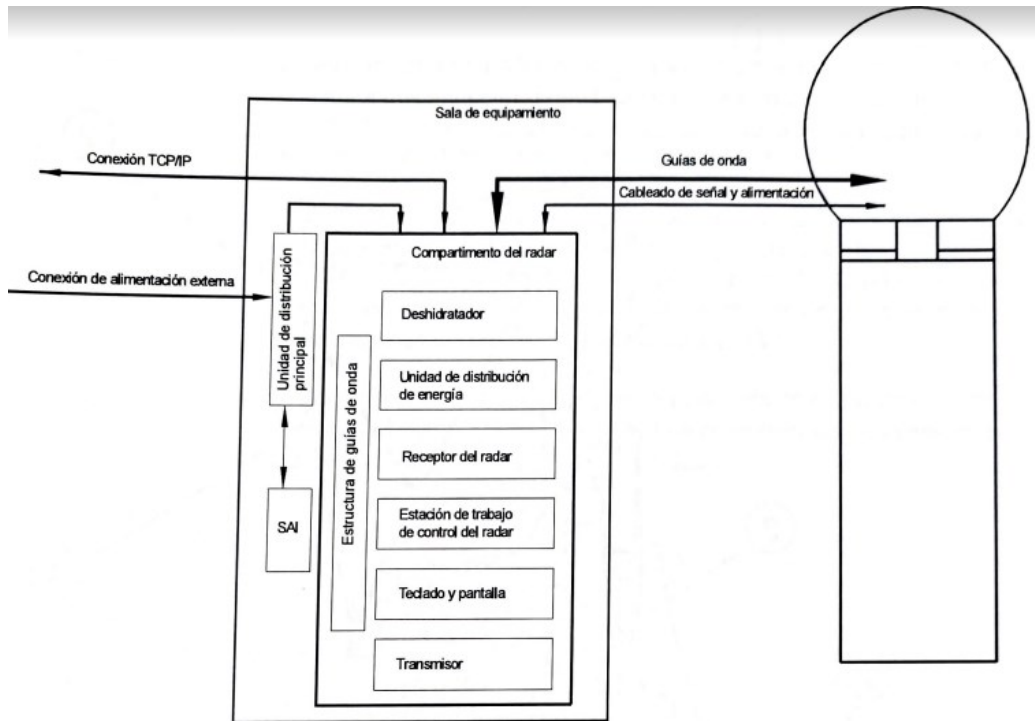


Figura 34. Diagrama del hardware del radar (Vaisala, 2019)



Figura 35. Componentes RAC Vaisala WRM200 sector Tablazo (Elaboración propia)



Figura 36. Radar WRM200 Vaisala sector Tablazo (Elaboración propia)

La parte fundamental que se reconoció en la visita del lugar donde se encuentra el radar (Tablazo), fue el servidor (Vaisala, 2019). El servidor está montado sobre un bastidor que ejecuta el software del sistema del radar. Este software está dividido en:

- **Software RCP8.** Controla la antena y el pedestal a través de un proceso de comunicación y administración de datos, usando dos buses CAN que permiten controlar la comunicación de la antena y el pedestal. Un bus se usa para diagnóstico control y otro para la administración de los datos del ángulo
- **Software RVP900.** Es el procesador de señales del radar. Usa la unidad de receptor digital IFDR para digitalizar en muestras la señal de Eco recibida. En general, es quien procesa los datos en el servidor del radar haciendo conversión en amplitud de la señal, procesamiento Doppler y procesamiento polarimétrico
- **Software de radar.** Administra el sistema general del radar y genera los productos de datos del radar.

En la Figura 37 se evidencia el orden en el que se encuentra el hardware dentro del gabinete del radar.

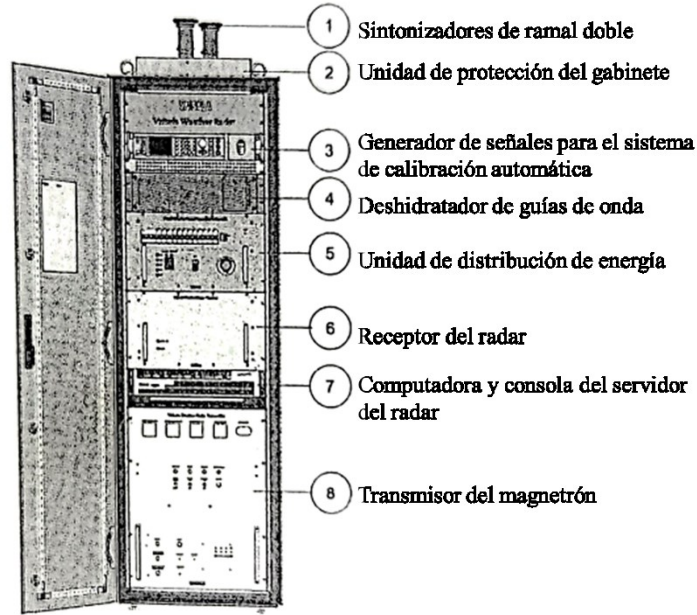


Figura 37. Disposición de Hardware en el gabinete del radar (adaptado de Vaisala, 2019)

El funcionamiento lógico de operación de exploración del radar se describe en la Figura 38:

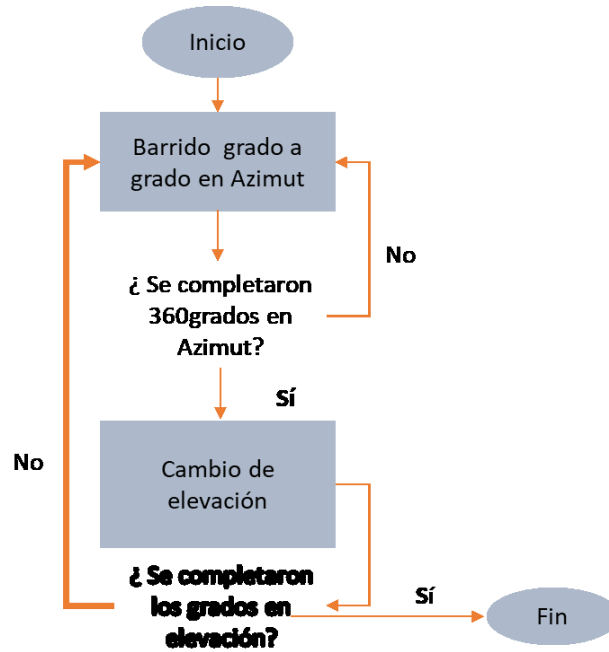


Figura 38. Diagrama de flujo operación del radar Vaisala (Aerocivil, 2017)

7.2.1. Estructuración de la Red de Radares en la Aerocivil (ATN)

En esta sección se presenta el estudio que fue realizado para comprender cómo funcionaba la red de radares en la Aerocivil. Dicha red es la Red ATN, esta emplea los sistemas de comunicaciones para los servicios de radioenlaces por microondas, red satelital y enlaces por fibra óptica. A continuación, en la Figura 39, se muestra cómo está conformada la red ATN colombiana.

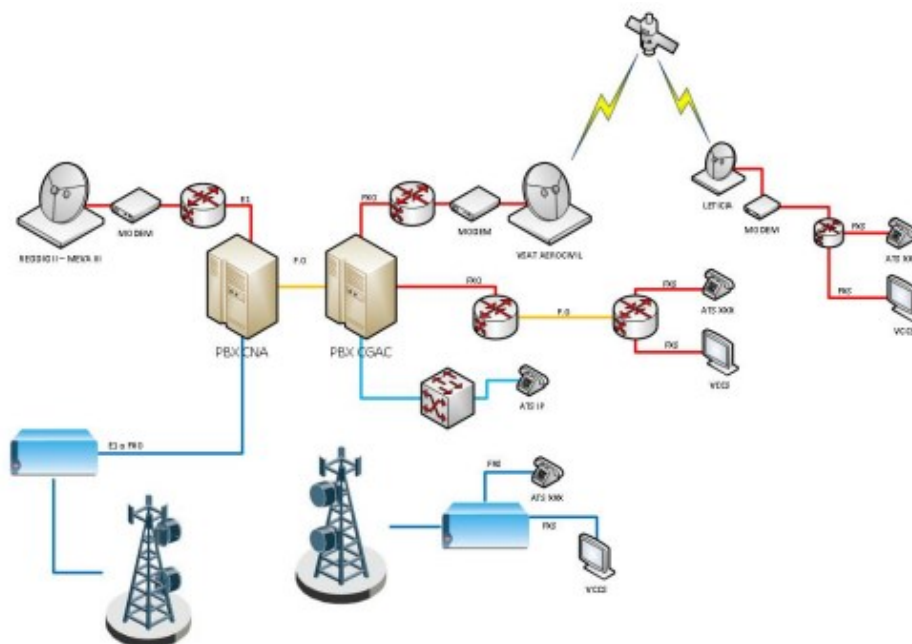


Figura 39. Servicios de la Red ATN (Aerocivil, 2017)

Se encontró que la Red de radares de la Aerocivil opera en la red denominada informática o Intranet, que es distinta a la red ATN, pero entre sí son compatibles, lo cual quiere decir que, “se garantiza que la información intercambiada por los canales meteorológicos operacionales puede también ser transmitida y recibida por la red de telecomunicaciones fijas aeronáuticas, sin efecto adverso sobre el funcionamiento de la red de telecomunicaciones fijas aeronáuticas y viceversa” (Aerocivil, 2017).

En concreto, se halló que la información de los radares, así como la de los demás dispositivos meteorológicos, es transmitida por la red informática, pero dicha información es migrada a la red ATN, por medio de la página web de la Aerocivil, tal como se representa en la Figura 40.

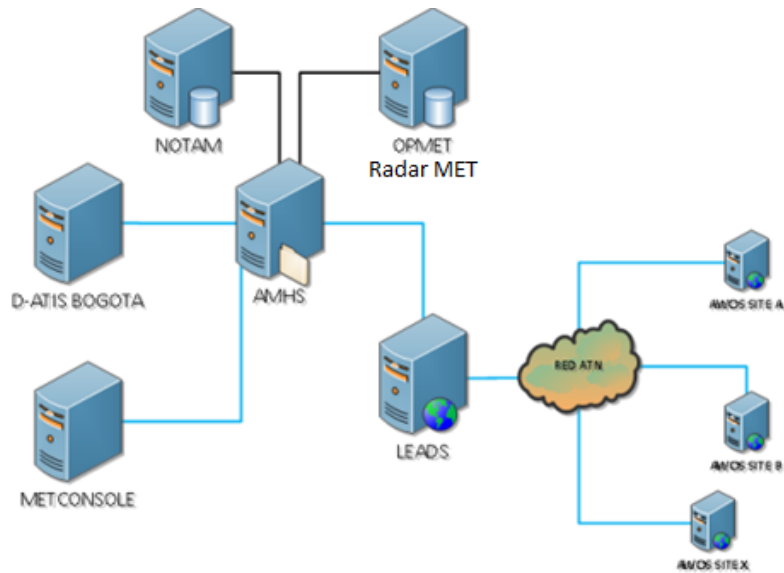


Figura 40. Migración de Red Informática a Red ATN (Aerocivil, 2017)

Al tener información de la constitución de la red ATN se hizo la evaluación de la estructura de la Red Informática para los radares meteorológicos de la Aerocivil. Se evidenció que su funcionamiento se basa en el protocolo TCP/IP, es decir, se cimienta en internet para la transmisión de datos entre los servidores de cada uno de los radares.

La conexión entre los servidores principales (Main) de cada radar se hace por conexión remota. La red al estar basada en TCP/IP usa protocolo SSH para posibilitar dicha conexión remota. SSH funciona bajo el modelo Cliente-Servidor. De esta manera, autentica los dos sistemas en conexión y cifra los datos que se transmiten por esta.

En general, la conexión SSH para los servidores de los radares de Aerocivil es factible al iniciar el protocolo TCP en el puerto 22, solicitando autenticación desde Cliente hacia Servidor. Los servidores están establecidos en sistemas operativos UNIX, concretamente CentOS 7 como distribución de Linux. En la Figura 41 se evidencia un ejemplo de conexión SSH por línea de comando entre el servidor Main ubicado en el CGAC hacia el servidor del radar del Tablazo.

```

radarop@ctr-main:~/Desktop
File Edit View Search Terminal Help
[radarop@ctr-main Desktop]$ ssh -X tab-radar
radarop@tab-radar's password:
Last login: Sat Dec 4 08:49:29 2021 from ctr-main
[radarop@tab-radar ~]$ iris

```

Figura 41. Conexión Remota de Main hacia Tablazo (Elaboración propia)

Así, se evidencia la conexión exitosa entre los dos servidores (Main - Tablazo) usando la consola de comandos. La estructura de la línea de comando es bastante simple. Se especifica el protocolo SSH y se apunta a la IP o dominio del Host. Según lo muestra la Figura 41, la conexión

se hizo apuntando al nombre de dominio (tab-radar) y no específicamente a la IP. Acorde a lo examinado, se realizó un diagrama que simplifica lo anteriormente escrito y evidencia una red centralizada de flujo de datos, como muestra la Figura 42.

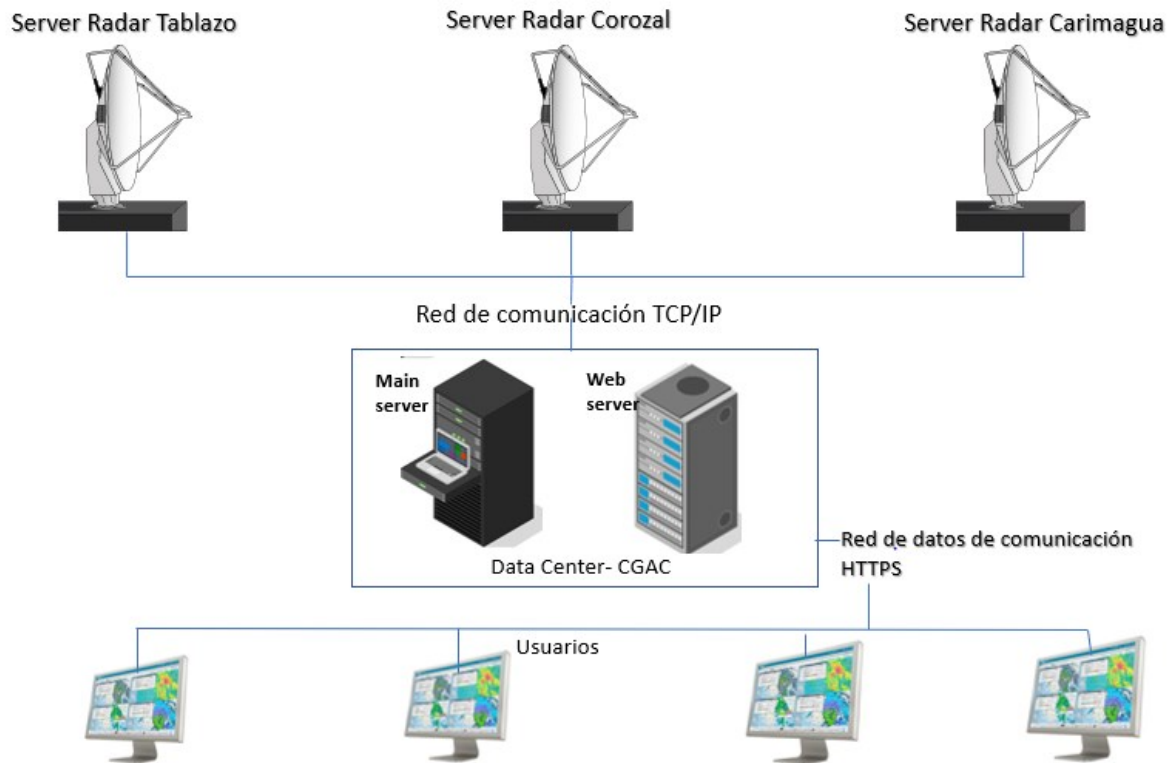


Figura 42. Configuración de Red de radares Aerocivil (Elaboración propia)

7.2.2. Evaluación del Control del Radar- Software IRIS

Se identificó que para el Radar WRM200 la forma de tener un control total de su sistema, es a través del software denominado IRIS, el cual se ejecuta en servidores con sistema Linux y tiene varias subdivisiones, a las que se le denomina licencias:

- **Licencia Iris Radar.** Es aquella que viene por defecto instalada en el servidor del Radar. Permite controlar los procesos de configuración de tareas y creación de productos meteorológicos
- **Licencia Iris Analysis.** Esta licencia se instala en la computadora host o cliente de Iris Radar. Funciona para hacer productos meteorológicos, pero no para controlar los procesos funcionales del radar.
- **Licencia IRIS Focus.** Se ejecuta en un servidor web y se encarga de procesar los datos provenientes de IRIS radar y/o de IRIS Analysis para que pueda ser visualizado a través de la web por los usuarios clientes del servidor Host.

A continuación, conforme a lo evaluado, se va a mostrar en la Figura 43 cómo es el funcionamiento de las licencias de Iris, de acuerdo con la configuración que la Aerocivil tiene a partir de lo estipulado en el manual de operario del radar:

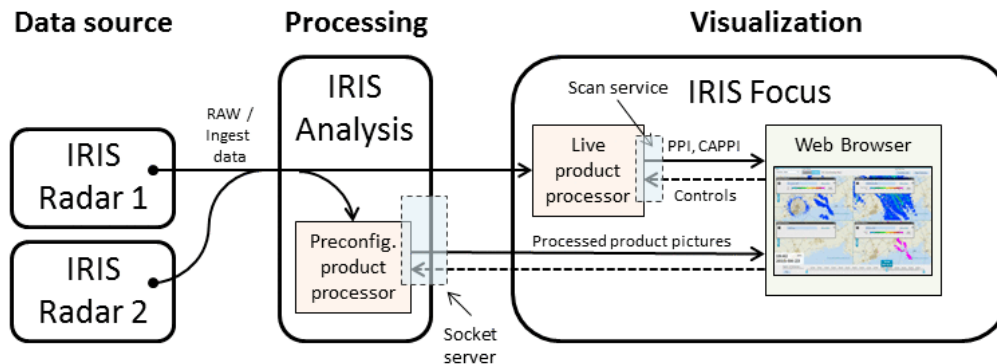


Figura 43. Arquitectura del Software IRIS (Vaisala, 2019)

Se halló que la forma en que la Aerocivil está usando las licencias para la generación de productos es la siguiente:

- Inicialmente, a través de IRIS Radar se comprimen los datos que llegan al receptor (RVP900). Aunque, a través del Iris Radar se pueden generar productos Meteorológicos, el propio Vaisala recomienda que esto no se haga y que únicamente se use esta licencia para enviar los datos en formato RAW al IRIS Analysis.
- En la configuración de la Aerocivil, IRIS Analysis se encuentra instalado en el host del servidor Main que está ubicado en el CGAC. Este está recibiendo los datos en crudo (RAW) desde el IRIS Radar del Tablazo. IRIS Analysis se usa para que, a partir de los datos en crudo del radar, los funcionarios del CNAP puedan crear productos de acuerdo con sus intereses. A continuación, en la Figura 44 se evidencia lo examinado para el proceso de generación de productos meteorológicos.
- IRIS Focus está instalado en un servidor web que constantemente le envía solicitudes a IRIS Analysis, para que este le transfiera los productos que se crearon previamente en él. Al obtener estos datos, Focus los procesa para que sean visualizables a través de la Web. Las solicitudes las hace por medio de un socket físico al que se encuentran conectados tanto el servidor Main (IRIS Analysis) como el servidor web (IRIS Focus).

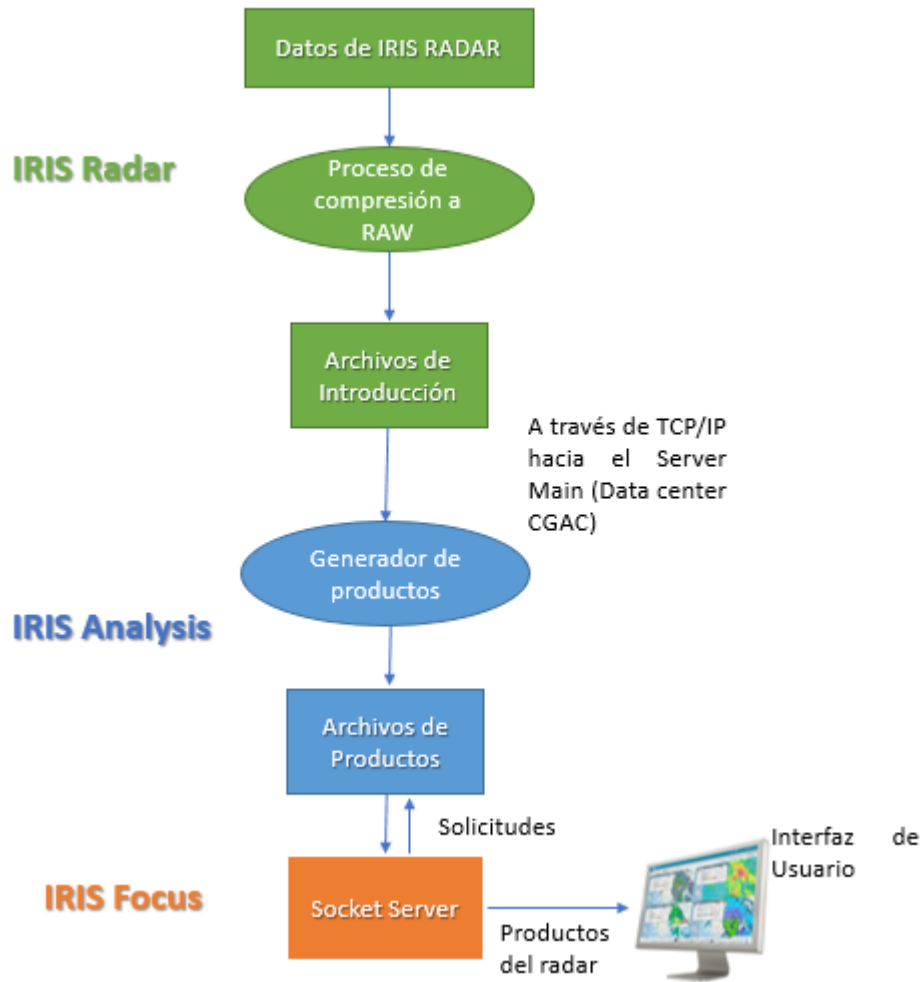


Figura 44. Proceso de generación de productos de radar (Elaboración propia)

Con lo anterior, se realizó la revisión directamente sobre el Servidor Main ubicado en el CGAC. Para ello se hizo una conexión SSH entre el servidor Main y el servidor IRIS Radar del Tablazo y en él se tomaron evidencias de la tarea que estaba configurada en el radar y qué tipo de datos estaba recibiendo el Main desde el Tablazo, arrojando el resultado que se muestra en la Figura 45.

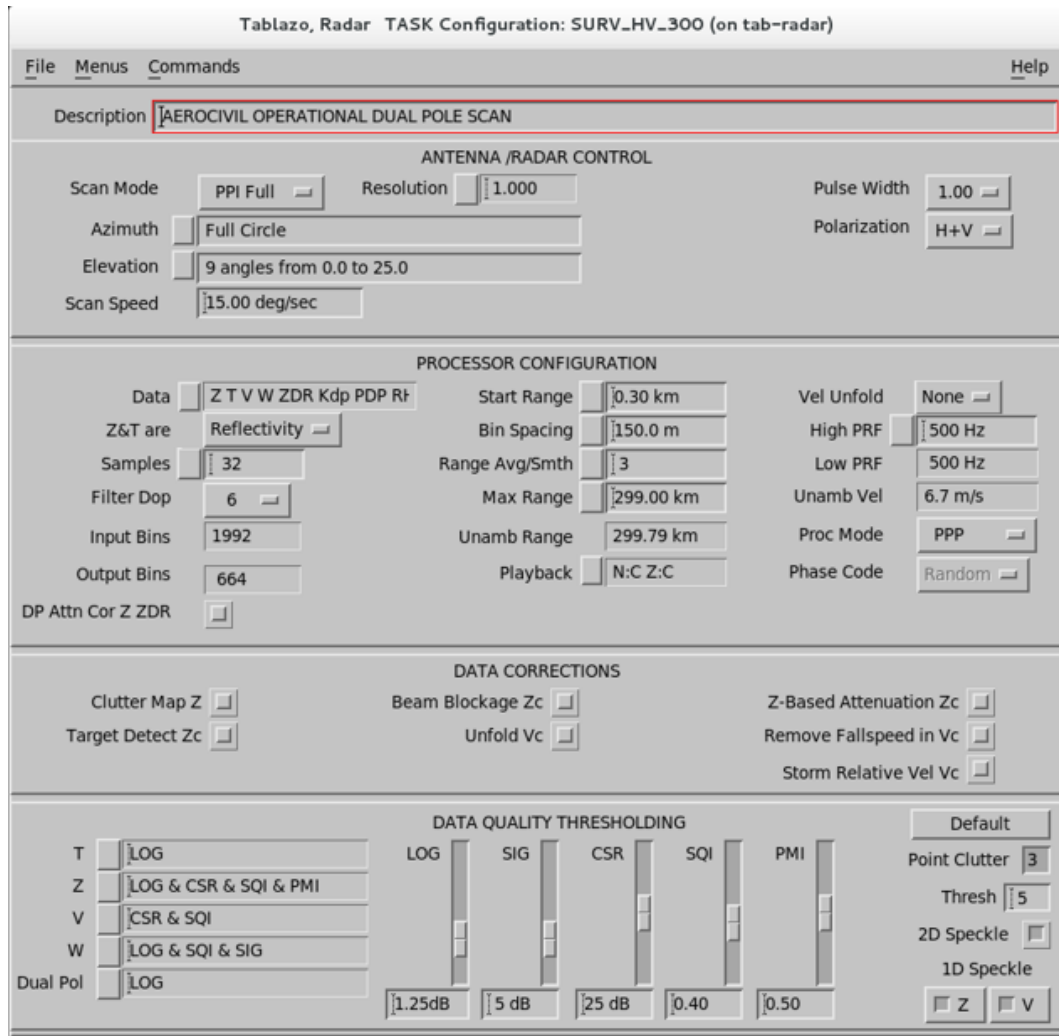


Figura 45. Tarea inicial del radar (Elaboración propia)

A partir de lo que se muestra en la Figura 45, se tiene el conocimiento de las características que contiene la tarea del radar del Tablazo. Aquí se obtuvo el conocimiento de los parámetros necesarios para que el radar tenga un modo de exploración volumétrica, parámetros mencionados en la sección del Marco teórico.

Se accedió al menú del software que permite visualizar los productos que se están generando desde el radar meteorológico, donde se encontró lo que se muestra en la Figura 46.

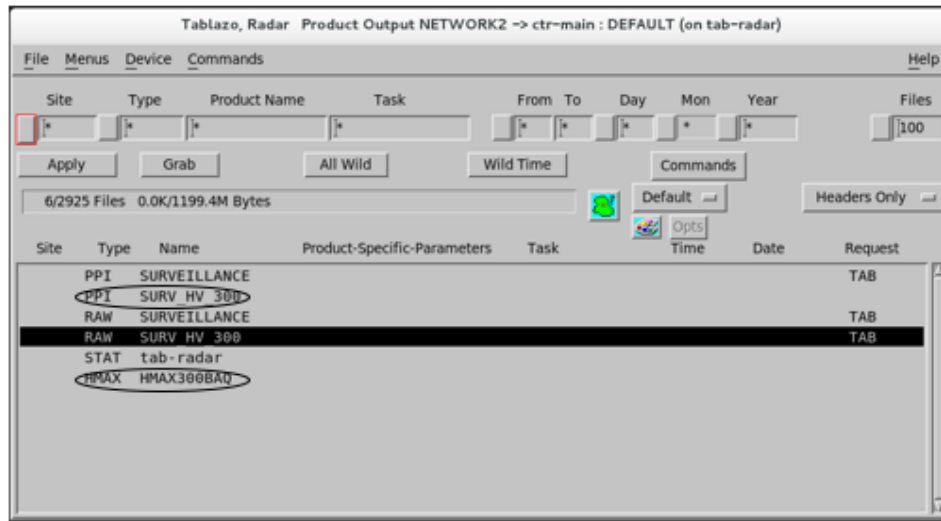


Figura 46. Productos de salida desde Iris Radar (Elaboración propia)

Como se evidencia en la Figura 46, se hallaron dos productos (señalados en la imagen) que no deberían estar configurados, pues tal como recomienda Vaisala desde el IRIS Radar únicamente debe salir productos Raw para evitar que el servidor se sature. Teniendo en cuenta los aspectos erróneos que se encontraron en el radar desde IRIS Radar, se revisaron los productos de salida que se envían desde IRIS Analysis hacia IRIS Focus, obteniendo lo que se evidencia en las Figuras 47, 48, 49 y 50.

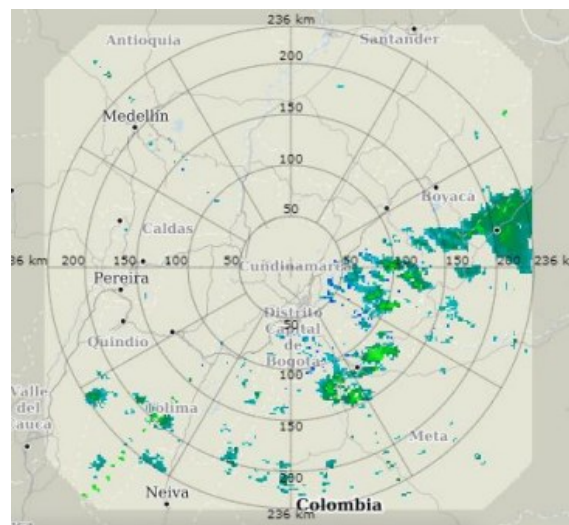


Figura 47. Producto CAPPI-Asterix (Elaboración propia)

Se investigó que el producto CAPPI-Asterix es fundamental para vigilancia e identificación de tormentas fuertes. Para los funcionarios del CNAP es un producto que mantienen en constante revisión para realizar sus pronósticos. Está establecido para rangos de 300 Km de cobertura radiales.

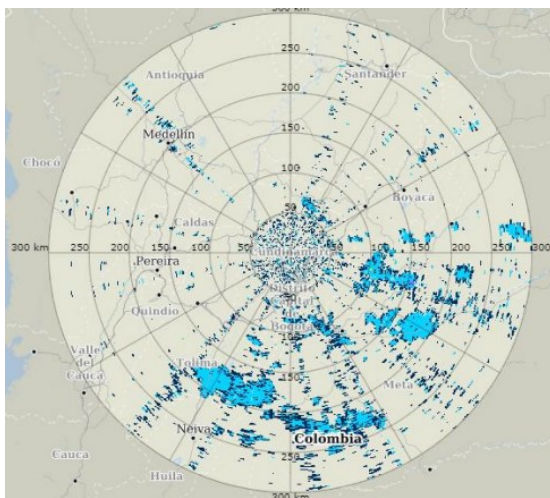


Figura 48. Figura 48. Producto HCLASS (Elaboración propia)

El Producto HCLASS se identificó como una herramienta innovadora de este radar, ya que permite clasificar los objetivos o blancos meteorológicos, tales como lluvia, granizo, graupel y nieve, de forma directa. A través del panel de color muestra al usuario si hay presencia y formación de los blancos meteorológicos anteriormente mencionados. Sin embargo, se evidencia, a partir de sus parámetros de reflectividad, que los datos que arroja no son correctos. Como se evidencia en la Figura 48, la mayor cantidad de objetos meteorológicos los muestra como nieve, fenómeno que para la atmósfera tropical en la que se encuentra Colombia es poco probable de producirse. Así que se estableció que este producto es muy poco usado por los funcionarios del CNAP debido a la incertidumbre que presenta.

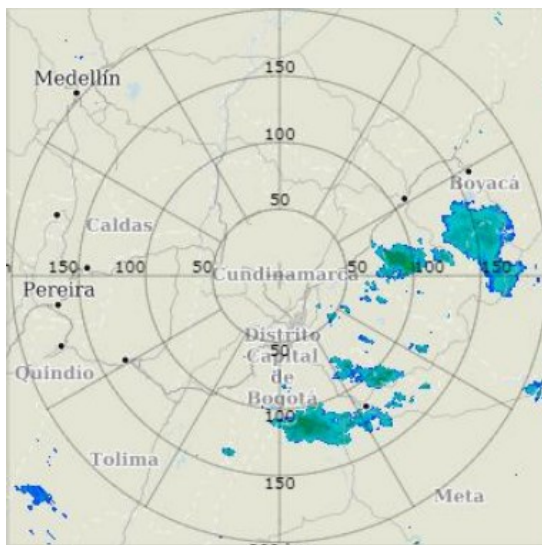


Figura 49. Producto VIL (Elaboración propia)

El VIL es un producto excelente para indicador de tormentas severas. Se conoció que es utilizado por los meteorólogos, pero su medición en datos se queda corta por la cantidad de ángulos de elevación con las que cuenta la tarea del radar.

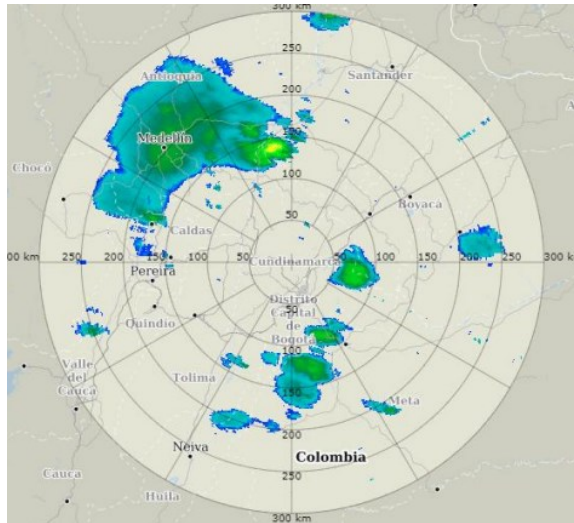


Figura 50. Producto Rain (Elaboración propia)

Este producto identifica la acumulación de pluviosidad por cada hora. Es un buen producto para la generación de alertas de inundación.

Además de los productos ya mostrados, se nombrarán a continuación otros productos que son generados por el radar pero que se encontró que no están siendo usados por los funcionarios:

- Rainfall
- VVP
- Tops

7.3. Propuesta de Mejora

7.3.1. Diseño Definitivo de Propuesta de Mejora

Se seleccionó la propuesta de mejora a partir del diagnóstico realizado con las investigaciones de las fases metodológicas I y II. A partir de allí se identificaron parámetros importantes para la configuración de tareas. En este diagnóstico se determinó que una gran afectación que el radar WRM200 del Tablazo tenía era el excesivo gasto de energía debido a la distancia de alcance de los haces en los niveles medios y altos de los ángulos de elevación configurados en su tarea “SURV_HV_300”. Dicha pérdida de energía se evidencia en un estudio que compartieron los técnicos operarios de radar Meteorológico del IDEAM y que se muestra en la Figura 51.

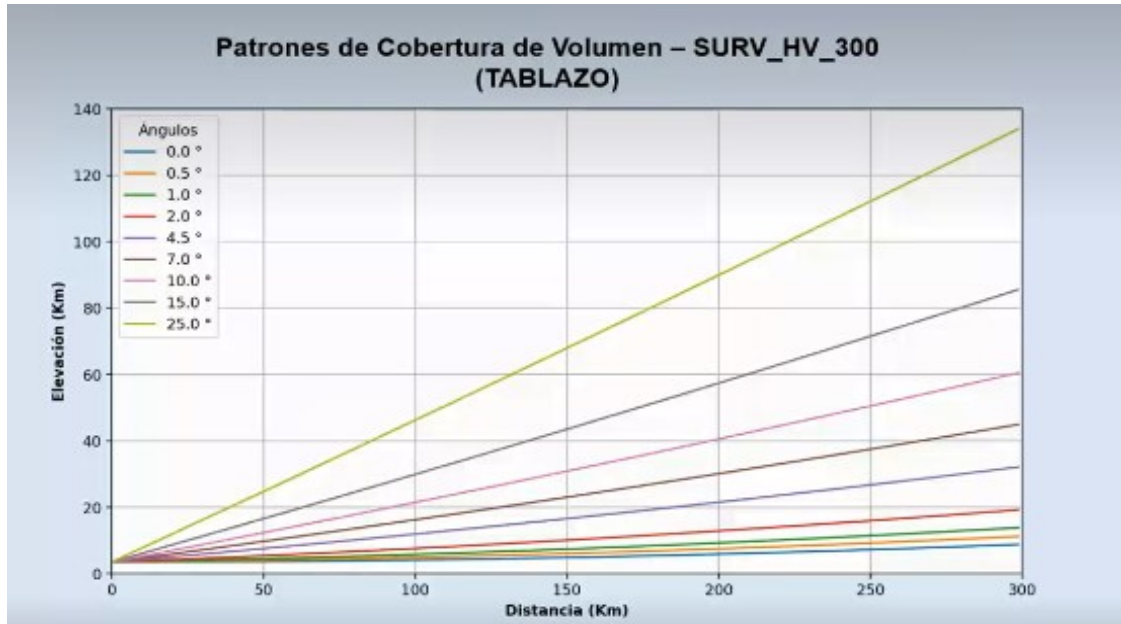


Figura 51. Patrones de cobertura del radar WRM200 (Munar y Ramirez, 2021)

Para dar solución a la problemática evidenciada en la Figura 43 se identificaron los factores que afectaban los patrones volumétricos, en cuanto a la altura máxima a la que puede llegar el haz del radar. Dicha distancia se determina por la ecuación de refracción estándar (1) que relaciona el rango máximo de cobertura del radar sobre su eje horizontal, el ángulo de elevación de la antena del radar, la altura de la antena del radar y el radio de la tierra, como se muestra a continuación,

$$H = \sqrt{r^2 + R^2 + 2rR' \cdot \sin \phi} - R' + H_0 \quad (1)$$

Donde

r : rango de cobertura del radar

R : radio de la tierra, para efectos métricos en 6374 Km

R' : $4/3 R$

ϕ : Angulo de elevación

H_0 : Altura del Tablazo m.s.n.m

Para poder reemplazar (1), se obtuvieron los parámetros de la configuración de la tarea “SURV_HV_300” y se evidencia en la tabla 7.

ANTIGUA TAREA (SURV_HV_300)	
Ángulos de elevación	0°, 0,5°, 1°, 2°, 4,5°, 7°, 10°, 15°, 25°
Azimut	Full circle 360°
FRP	500HZ para todos los ángulos
Rango	300 km
Duración del pulso	1 microsegundo

Tabla 7. Parámetros de configuración de tarea SURV_HV_300 (Elaboración propia)

A través de la documentación de los manuales se encontró que el FRP y el rango están relacionados entre sí. El FRP determina cuántas veces el radar emite energía por segundo y cuántas veces “escucha” los ecos en un segundo. Su relación con el rango es importante porque a partir de este se obtiene una limitante en la altura máxima del haz del radar. Entre mayor sea el FRP, más cercana es la distancia máxima del haz al radar, como se evidencia en la Figura 52.

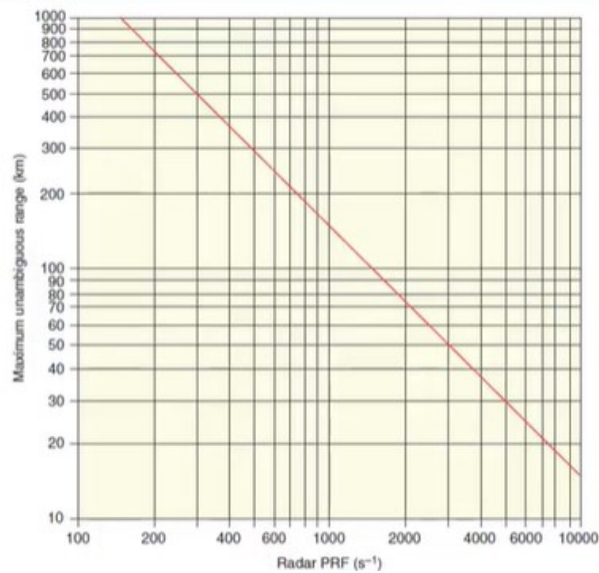


Figura 52. Relación Rango vs. FRP (Elaboración propia)

De forma matemática FRP se describe en (2) y rango en (3):

$$FRP = \frac{c}{2 \cdot rango} \quad (2)$$

$$Rango = \frac{c}{2 \cdot FRP} \quad (3)$$

Si la frecuencia de repetición es muy alta, no dará tiempo para que los ecos que estén a mayor distancia puedan ser mapeados por el radar. Y si la frecuencia de repetición es muy baja, pueden ocurrir ecos de segundo viaje, que es cuando hay incertidumbre sobre cuál eco corresponde al primer pulso enviado y cuál al segundo. En la figura 53 se evidencia el fenómeno:

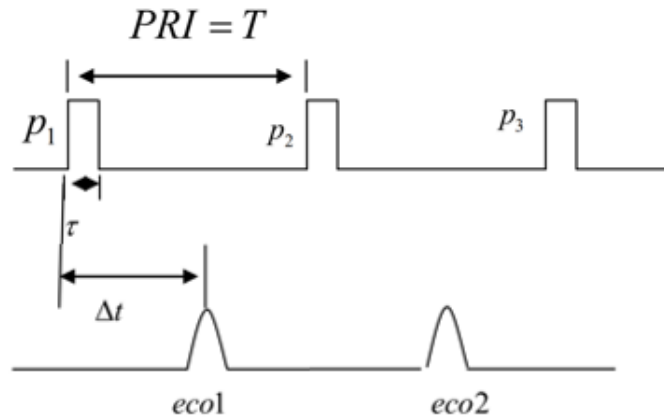


Figura 53. Ecos de segundo viaje (Elaboración propia)

Al conocer estas afectaciones y los parámetros que intervienen en ellos, se calcularon las distancias máximas a las que llegan los haces del radar de la tarea SURV_HV_300, los cuales se evidencian en la Tabla 8, cálculos realizados al reemplazar (1). Con dicho cálculo se constató la problemática que Munar y Ramirez (2021) expusieron.

$$H = \sqrt{300km^2 + 6374km^2 + 2 * 300km * 6374 Km * \left(\frac{4}{3}\right) * \sin \sin (0^\circ) - 6374 Km * \left(\frac{4}{3}\right) + 3650m} \quad (1)$$

La ecuación se repite para hallar cada altura máxima y solo cambia el ángulo de elevación de acuerdo con lo plasmado en la Tabla 7.

Ángulo de Elevación	Altura en (Km)	Altura (Ft)
0°	8.7	28543
0.5°	11.4	37401
1°	13.9	45603
2°	19.2	62992
4.5°	32.2	105643
7°	45.2	148294
10°	60.6	198818

15°	85.9	280839
25°	134.5	441272

Tabla 8. Alturas máximas de los haces para la tarea SURV_HV_300 (Elaboración propia)

Además de estudiar los haces del radar, también se estudiaron los parámetros principales que constituyen a la tarea. Específicamente, los parámetros son:

- FRP
- Rango
- Pulsos
- Duración del pulso
- Bin spacing (normalmente 150 en radares banda C)
- Velocidad inequívoca
- Tiempos parciales de escaneo
- Tiempos totales

Cada uno de los parámetros anteriores se definen a través de ecuaciones que, desde el diagnóstico, permitieron establecer el rendimiento del radar. El número de pulsos está definido por (4), y permite determinar el número de muestras por haz:

$$PRF * \frac{Resolution}{Scan Rate} = Sample \quad (4)$$

La resolución para (4) se refiere a cuánto se explora el sector por un solo rayo; para el caso de la tarea SURV_HV_300 es 1°. Scan Rate es el número de grados que la antena se mueve por segundo; en el caso de la tarea mencionada son 15° por segundo. Reemplazando (4) se tiene:

$$500Hz * \frac{1}{15} = 33 \text{ muestras} \quad (4)$$

Con esa cantidad de muestras se tiene otra dificultad en la tarea, pues, según manual, para que los datos que recolecta el radar tengan menor incertidumbre, como mínimo las muestras por haz deben ser de 40 para evitar obtener lecturas que no sean certeras. Es importante también definir la duración de los pulsos, debido a que esto afectará la actualización de escaneo del radar o resolución temporal. La duración está definida por (5):

$$\frac{2 * Bin spacing}{C} = Duración \text{ por pulsos} \quad (5)$$

Reemplazando (5) para la tarea SURV_HV_300:

$$\frac{2 * 150m}{3 * 10^8 m/s} = 1 us(5) \quad (5)$$

Dicho resultado es una duración común en los radares y además cuida el factor de labor del radar sin exponerlo a un sobre calentamiento.

El siguiente concepto importante dentro del parámetro de la configuración de la tarea es la velocidad inequívoca, se define por (6) y permite saber la velocidad radial que puede ser observada sin ambigüedad.

$$\frac{PRF * \lambda}{4} = Unamb Vel. \quad (6)$$

Reemplazando (6) para la tarea SURV_HV_300:

$$\frac{500 Hz * \frac{3 * 10^8}{5.625 GHz}}{4} = 6.66 m/s \quad (6)$$

En la Tabla 9 se resumió el diagnóstico técnico de la tarea SURV_HV_300, que servirá como referencia comparativa para la solución que se propuso.

Ángulo de Elevación	Acimut °	FRP Hz	Rango Km	Pulsos	DP (uSeg)	Bin Spacing (m)	Unam Vel. (m/s)	T.parciales (s)	T. totales (s)
0°	360	500	300	32	1	150	6.66	26.75	26.75
0.5°	360	500	300	32	1	150	6.66	27.15	53.90
1°	360	500	300	32	1	150	6.66	25.13	1:19
2°	360	500	300	32	1	150	6.66	25.33	1:44
4.5°	360	500	300	32	1	150	6.66	26.03	2:10
7°	360	500	300	32	1	150	6.66	27.01	2:37
10°	360	500	300	32	1	150	6.66	25.41	3:02
15°	360	500	300	32	1	150	6.66	27.60	3:30
25°	360	500	300	32	1	150	6.66	1:27:3 2	4:57

Tabla 9. Diagnóstico técnico (Elaboración propia)

Además del diagnóstico que se hizo con herramientas matemáticas, también se tuvieron en cuenta las apreciaciones de los funcionarios que trabajan con el radar, dejando como principales afectaciones a la operatividad del radar lo siguiente:

- El radar no posee un objetivo claro para su funcionamiento, ni en meteorología Aeronáutica, hidrología o climatología, ya que su configuración fue establecida por defecto sin considerar la atmósfera colombiana ni los requerimientos aeronáuticos
- Rendimiento subutilizado, ya que se están creando procesos que no están siendo usados por los funcionarios
- Procesos sobrantes que ocupan capacidad en red y en softwares. Estos procesos sobrantes se refieren a archivos de introducción que estaban siendo creados en el sitio del servidor del Tablazo y no se estaban enviando al CGAC. Por lo que estos archivos congestionaban el almacenamiento en disco del servidor y se malgastaba procesamiento al ser datos que se procesaban, pero no se les daba uso.
- No se tuvo un criterio claro para la resolución espacial (equidistancia entre ángulos de elevación de la antena)

A partir del diagnóstico realizado, la mejora que se decidió desarrollar consistió en un cambio de estrategia operativa, es decir, cambiar la tarea SURV_HV_300, debido a que el desempeño del radar no va a ser el óptimo si la tarea, la cual proporciona los datos para generar productos meteorológicos, se encuentra sin un objetivo específico para los requerimientos aeronáuticos y con parámetros que ignoran la atmósfera del trópico

La solución partió de la creación de objetivos que dieron coherencia a las estrategias técnicas que se configuraron en el software del servidor del radar.

Objetivo principal de la mejora. Medir, detectar y localizar convenciones de gran rango y eventos convectivos severos generalizados que afecten principalmente al Área Terminal Bogotá (TMA).

Objetivos específicos. No se basan en una única tarea como la que el radar tenía programada, sino en un volumen de 3 subtareas, cada una de ellas con un objetivo en concreto:

- **AERO_JAC_A:** La primera subtarea opera en un bloque de ángulos de elevación bajos. Su objetivo es hacer vigilancia a 300 km de rango a la redonda para tormentas y formaciones de nubes distantes.
- **AERO_JAC_B:** La segunda subtarea opera en un bloque de ángulos medios. Su objetivo es hacer mediciones de altas precipitaciones en las regiones promedios de Isoterma 0° sobre la TMA de Bogotá. Con un rango de cobertura de 150 Km a la redonda
- **AERO_JAC_C:** La tercera subtarea opera en un bloque de ángulos altos. Su objetivo es hacer la verificación de formación de granizo y/o tormentas en un rango cerrado. Con un rango de cobertura de 70 Km a la redonda.

Los ángulos de elevación que se escogieron para operar en el bloque bajo de la primera subtarea se basan en la altura que los haces pueden llegar a alcanzar en la atmósfera, con el fin de que logre cubrir la zona de la Isoterma de 0° sobre la sabana de Bogotá. Esta zona de Isoterma es importante vigilar porque a partir de ese punto es que la temperatura en la atmósfera empieza a disminuir y puede inducir a la creación de granizo que llegue a precipitar.

La determinación de la zona de isoterma 0° es estocástica. Sin embargo, se recolectaron los datos de los últimos 5 años y se calculó una zona promedio entre los 3 km y 8 km de altura. Esta información se pudo obtener en una visita realizada al IDEAM para entender la actividad de radiosondeo. En la Figura 54 se evidencia la actividad de radiosondeo realizada en la ciudad de Bogotá y en la Figura 55 se evidencian los datos obtenidos de la radiosonda.



Figura 54, Realización de radio sondeo (Elaboración propia)



Figura 55. Dato de radiosonda para verificación de Isoterma (Elaboración propia)

Los ángulos de elevación para el bloque medio se escogieron de tal manera que los haces alcanzarán una altura que pudiera cubrir la zona sobre la TMA de Bogotá, a fin de identificar las precipitaciones sobre la zona en la que navegan las aeronaves (hasta 18 Km en altura). Y los ángulos del bloque alto se escogieron de tal manera porque permiten cerrar el cono de silencio que había en la anterior tarea. De este modo se mantiene monitoreada el área más cercana al radar.

En la Figura 56, se evidencia la característica de la construcción de la nueva tarea.

Variable	Bloques		
	AERO_JAC_A	AERO_JAC_B	AERO_JAC_C
Ángulos de elevación	-1°, 0°, 0.5°	0.9°, 1.3°, 2.3°, 4.1°	7.4°, 13.3°, 24°, 43.2°
Azimut	Full circle 360°	Full circle 360°	Full circle 360°
Resolución	1.0	1.0	1.0
Modo de escaneo	PPI FULL	PPI FULL	PPI FULL
Polarización	H+V	H+V	H+V
PRF	500 HZ	1000 HZ	2100 HZ
Samples/muestreo	33	40	50

Figura 56. Configuración de la tarea actual (Elaboración propia)

Esta nueva tarea, como se expuso anteriormente, permitió tener diferentes niveles de exploración con datos más certeros en zonas de la atmósfera que con la anterior tarea no estaban siendo monitorizados de forma correcta. En la Figura 57, se evidencian las zonas cubiertas con AERO_JAC:

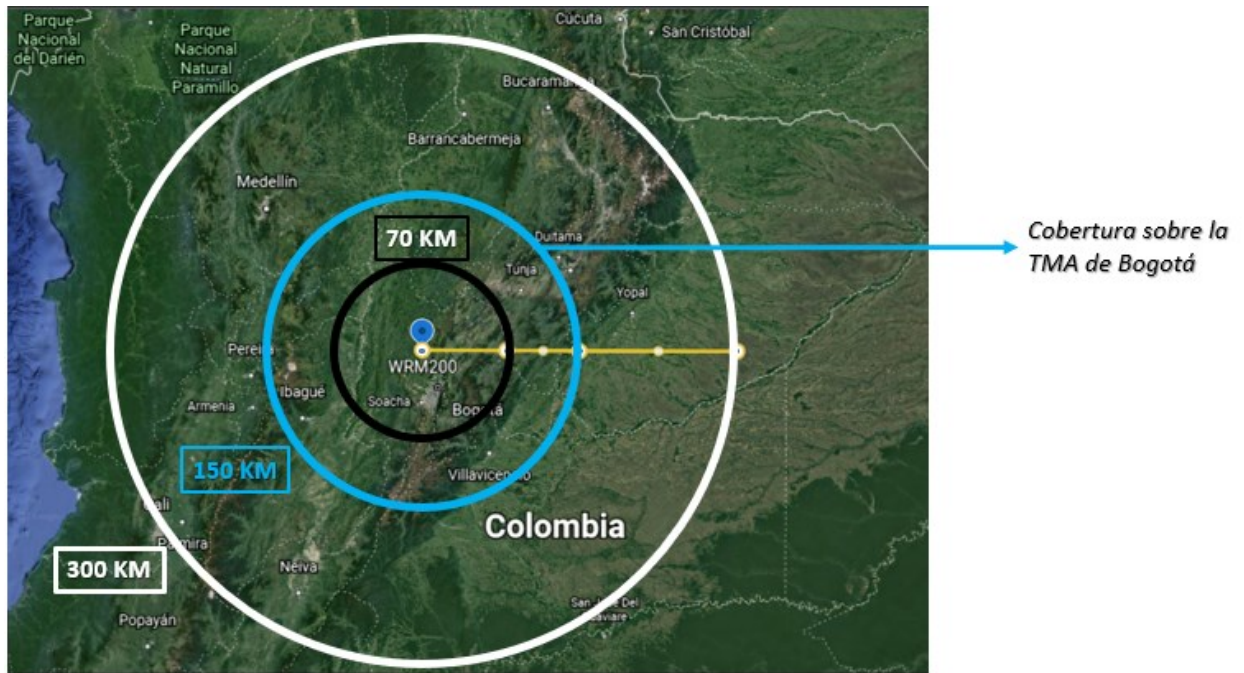


Figura 57. Volumen de cobertura de AERO_JAC (Elaboración propia)

A continuación, en las Figuras de la 58 a la 50 se evidencia la configuración de la tarea en el servidor Main del CGAC de acuerdo con los parámetros que se mostraron en la Figura 56.

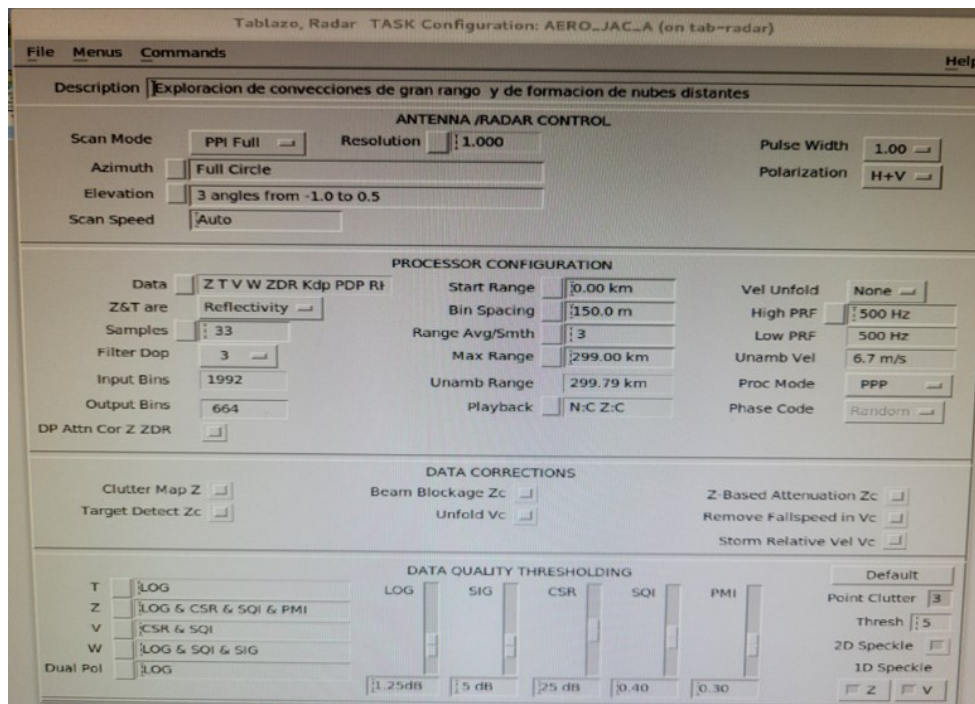


Figura 58. Subtarea 1 AERO_JAC_A (Elaboración propia)

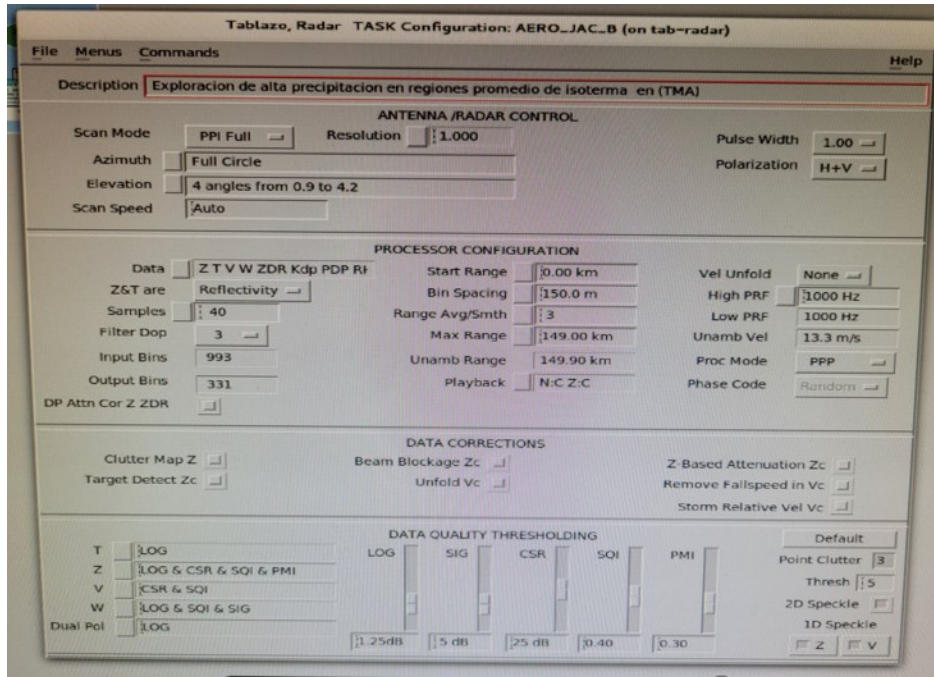


Figura 59. Subtarea 2. AERO_JAC_B (Elaboración propia)

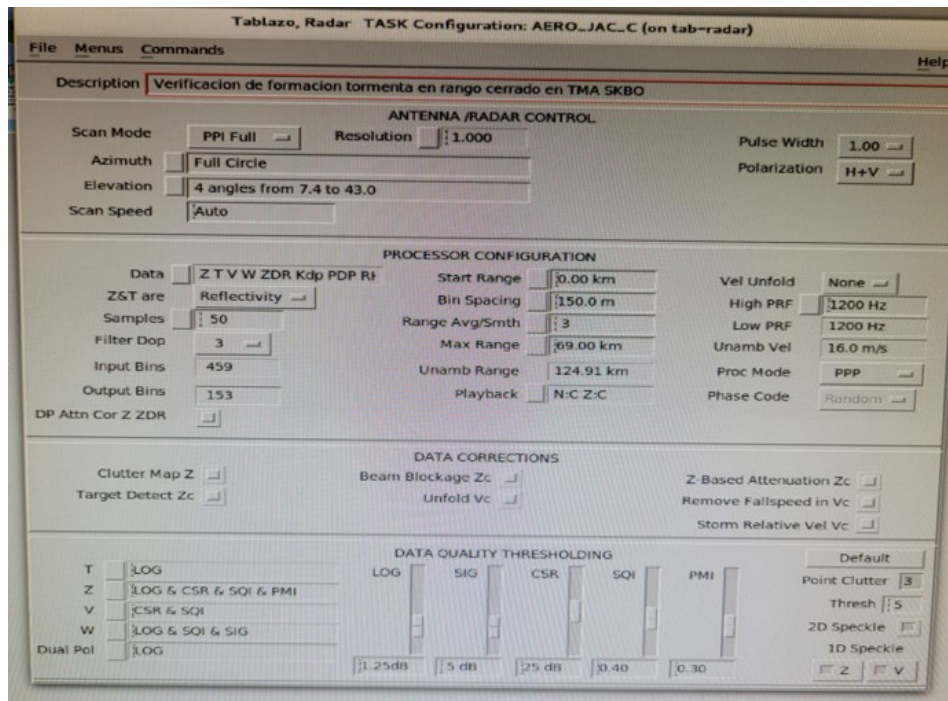


Figura 60. Subtarea 3 AERO_JAC_C (Elaboración propia)

7.3.2. Validación de la Solución

De acuerdo con la implementación hecha, se obtuvieron los resultados de los alcances de los haces del radar de la nueva tarea con las nuevas características usando la ecuación (1). A partir de allí se obtuvo lo evidenciado en la Figura 61.

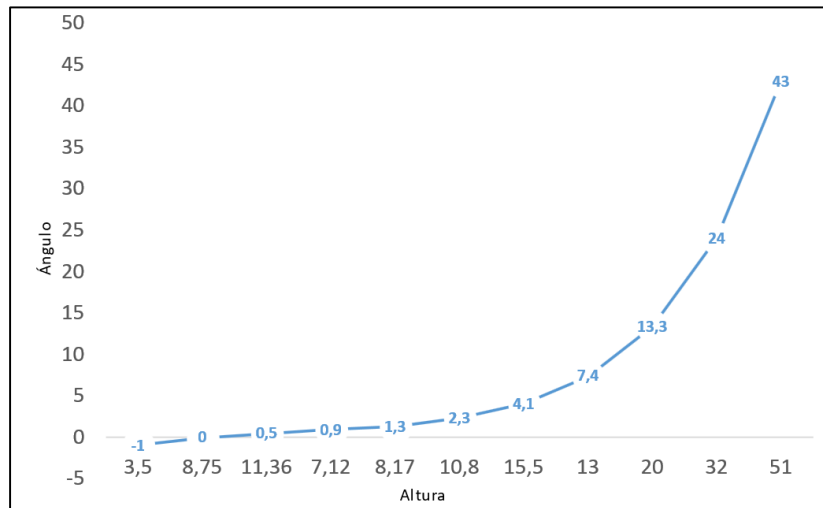


Figura 61. Alcance Máximo del Haz con respecto a los ángulos de elevación de la antena (Elaboración propia)

Con los resultados de la Figura 61 se evidencia que la altura de los haces se redujo y que estos se enfocaron en las zonas establecidas por los objetivos, lo cual permitirá reducción de los ecos de segundo viaje, menor pérdida de potencia y mayor efectividad en la captura de datos de objetivos meteorológicos.

A continuación, en la Figura 62 se presentan las mejoras obtenidas con respecto a la antigua tarea:

AERO_JAC	SURV_HV_300
Cantidad de ángulos: 11 ángulos de elevación	Cantidad de ángulos: 9 ángulos de elevación
Cantidad de datos: 12 (Se sumó SQI, TE, ZE)	Cantidad de datos: 9
Rendimiento: Haces reducidos en altura (mejora promedio del 70%)	Rendimiento: Haces superiores a la estratosfera
Muestreo: 5% más muestras por haz	Muestreo: Estático de 32 muestras

Figura 62. Mejoras con respecto a la antigua tarea (Elaboración propia)

Las mejoras destacables, como lo evidencia la Figura 62, son la reducción en el alcance de los haces en altura, estando ahora más enfocados en los objetivos determinados. También se ve mejora

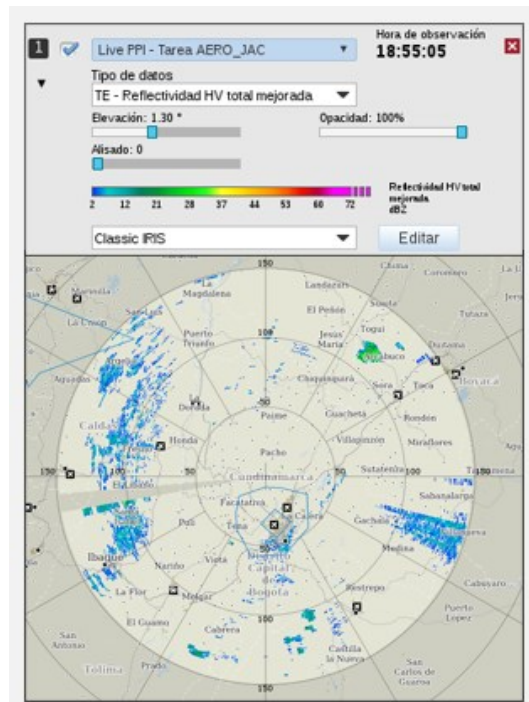


Figura 64. Reflectividad mejorada (Elaboración propia)

7.3.3. Limitaciones de la Solución

La solución mejoró en rendimiento y en operatividad al radar meteorológico. No obstante, esta solución está enfocada en la operación aeronáutica, y aunque tiene elementos que pueden servir para compartirse con las otras entidades a nivel nacional, hace falta aunar esfuerzos para comprometerse en una tarea híbrida en la que el enfoque beneficie en porcentajes iguales a los usuarios del radar. Por otro lado, al haberse cambiado de forma completa la estrategia del radar y haberle añadido un ángulo negativo a la fase de vigilancia, no se logró obtener un análisis de potencia en las zonas urbanas para cuantificar qué tanto podría llegar a afectar la potencia en este ángulo a las zonas habitadas que son aledañas al radar. Dicha medición no se pudo hacer debido a la falta de equipo especializado para ello.

7.3.4. Evaluación del Impacto

La mejora permite tener datos meteorológicos de una forma más rápida en comparación a la mayor parte de los radares en Latinoamérica con propiedades Doppler y banda C. Esta reducción de tiempo es excelente para la gestión aeronáutica, la cual necesita que los escaneos se actualicen de forma casi instantánea. Hacer un monitoreo en tiempo real no es factible aún, pero la reducción del tiempo es algo que los funcionarios en la Aerocivil valoran con creces. Este proyecto logró que la Aeronáutica civil pudiera aprovechar su inversión en vanguardia tecnológica, se agilizan los pronósticos de meteorología y a su vez brinda una mayor seguridad al sector de transporte aéreo, reportando con mayor antelación fenómenos adversos en la atmósfera.

8. Conclusiones y Recomendaciones

Se cumplió el objetivo general porque a partir del diagnóstico y evaluación rigurosa del radar WRM200 del sector Tablazo, se logró evidenciar las falencias que tenía en estrategia de operación, pues su enfoque no estaba destinado a las necesidades aeronáuticas ni a la atmósfera tropical colombiana. La intervención realizada al radar logró establecer un real objetivo de operación aeronáutica, centrando sus labores en la monitorización de la TMA de Bogotá y recolectando datos acertados de la atmósfera colombiana.

El nivel de operatividad mejoró en rendimiento en un 70%, como se muestra en la Figura 53 del presente documento. Este aumento del rendimiento se debió al aprovechamiento de la energía del radar al reducir la duración de los pulsos recortando el alcance máximo de los haces disparados por el radar hacia la atmósfera. Con dicha reducción se contribuyó a alcanzar una mayor precisión de los datos recolectados por el radar, mejorando la calidad de los pronósticos realizados por el CNAP.

La operatividad del radar del Tablazo logró reducir su tiempo de exploración atmosférica comparado con la estrategia antigua, recolectando mayor cantidad de muestras, con la capacidad de generar nuevos productos gracias a la configuración de nuevas variables polarimétricas.

Con esta mejora, el radar logra ser referencia para que los demás radares de la Aerocivil y de las demás entidades nacionales con labor meteorológica aúnen esfuerzos para la creación de mesas de trabajos que permitan crear tareas híbridas que brinden una mejor calidad de datos, precisos y útiles para la hidrología, climatología e industria aeronáutica.

Además, se pudo examinar la actualidad de los esfuerzos de las entidades para crear el Sistema Nacional de Radares Meteorológicos de Colombia, donde se evidenció a través de los resultados obtenidos, que dicha creación va por buen camino, al menos desde el aspecto técnico. Al intervenir el radar del Tablazo, se lograron crear nuevas mesas de trabajo, una por mes desde el mes de septiembre de 2021 hasta enero 2022, entre las entidades para compartir ideas que contribuyan a la creación de estrategias conjuntas en los radares que brinden satisfacción a las necesidades de cada entidad y beneficien las labores meteorológicas del país. Sin embargo, se necesita un mayor esfuerzo desde la parte administrativa para que ejecuten una guía que apunte a la realización de un organigrama estable que dé estructura al SNRMC.

La finalización de este proyecto contribuyó en una mayor resolución temporal y espacial en la recolección de datos sobre objetivos meteorológicos, logrando además amplificar la cantidad de muestras recolectadas de la atmósfera, lo cual permite que el radar sea más preciso y sus productos menos ambiguos. Por lo tanto, se concluye que la implementación de la nueva estrategia fue un éxito en cuanto a resolver el principal problema de subutilización de la herramienta, pues se logró explotar eficientemente las capacidades del equipo.

Este proyecto proporciona una mejoría en la calidad de los servicios meteorológicos y abre las puertas para que la academia siga impactando en proyectos de la industria colombiana con

proyectos que tienen una verdadera repercusión en los sectores sociales. Además, permite al estudiante involucrarse en situaciones reales que permiten crear innovación y desarrollo en las empresas.

Se recomienda hacer un estudio e intervención similar para los demás radares que tiene la Entidad, a fin de que todos los equipos estén operando de forma óptima, teniendo en cuenta las limitaciones geográficas en las que se encuentran emplazados estos radares y el estudio de Isoterma para la atmósfera de la región, tal como se realizó en este proyecto que sirve como base para futuras mejoras a los demás radares de la Aerocivil. Además, es necesario seguir contribuyendo con mesas de trabajo y soluciones técnicas y administrativas para la creación del SNRMC, haciendo trabajos híbridos con las demás entidades colombianas en busca de una mejor operatividad de los radares nacionales y poder establecer con carácter administrativo la formación contundente de esta red.

También se recomienda realizar un análisis del espectro en la zona del radar del Tablazo con apoyo de la ANE, para verificar algunas lecturas de objetivos no meteorológicos que el radar está haciendo en su nueva configuración en los ángulos de elevación más bajos. La finalidad del análisis es obtener la procedencia de lo que está generando la captación de estos datos por parte del radar. Verificar si se debe por equipos o dispositivos cercanos que emiten radiación al radar a una potencia y/o frecuencia alta.

Se recomienda hacer un estudio para la creación de estrategias para radar que permitan de manera técnica y administrativa acelerar la formación del SNMRC. La finalidad es lograr estrategias conjuntas, que logre unificar las tareas de cada uno de los radares de las entidades del país que tienen labores meteorológicas. Estas estrategias deben partir de la creación de objetivos que satisfagan las necesidades de cada entidad, teniendo en cuenta las limitantes tales como el tipo de radar, la banda de frecuencia en la que opera y el entorno en el que está instalado.

9. Referencias


- Acosta, M. (2013). Radares Meteorológicos de bajo costo para la detección de precipitación y desarrollo de operaciones Aéreas en Colombia. *Revista*, 2(22), 111. doi:1692-7257
- Aerocivil. (03 de 10 de 2017). Manual de documentación PNA-COL. *Plan de Navegación Aérea para Colombia-Volumen II. Instalaciones y Servicios*. Bogotá, Colombia.
- Ávila, J., Herrera, G., Júnez, H., y Váldez, A. (abril de 2021). New approach for local C-band weather radar precipitation calibration. *Atmósfera*, 34(2), 171. doi:<https://doi.org/10.20937/atm.52763>.
- Baldemar, A., Dominguez, R., Magaña, V., Caetano, E., y Carrizosa, E. (2015). Calibración hidrológica de radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 21(4), 43. doi:2007-2422
- Buderi, R. (1996). *The invention that changed the world*. New York: Simon and Schuster.
- Calderón, M., y Redondo, J. (2019). Diseño e implementación de una herramienta de software libre para la detección y corrección de propagaciones anómalas en radares meteorológicos para zonas ecuatoriales. Bogotá D.C: Universidad Distrital F.J.C. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/15083>
- Catarina. (21 de 01 de 2022). *Capítulo 1 - Propagación de ondas electromagnéticas*. Obtenido de Universidad de las Américas Puebla: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/vila_b_ca/capitulo1.pdf
- Crouch, J., Pardo, N., y Miller, C. (2014). Dual polarisation C-band weather radar imagery of the 6 August 2012 Te Maari Eruption, Mount Tongariro, New Zealand. *Elsevier*, 286(1), 415. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.05.003>
- Díaz, M. A. (2005). *Modelado de un radar doppler de pulsos (PDR)*. Ciudad de México: CITEDI.
- Gomez, E., Robayo, G., Camargo, J., y Cadena, L. (2018). Análisis de datos de Radares Meteorológicos en el territorio colombiano para el diagnóstico y detección de errores. *Bistua*, 16(1), 56. doi:<https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2018.3192>
- Grupo de Divulgación y Prensa. (10 de Noviembre de 2017). *Aercivil*. Recuperado el 4 de mayo de 2021, de <https://bit.ly/3ftKOYX>
- Hernandez, S. (9 de Noviembre de 2014). ¿Por qué el sector aéreo colombiano parece estar en un cuello de botella? *El País*. Obtenido de <https://www.elpais.com.co/colombia/por-que-el-sector-aereo-no-parece-estar-en-un-cuello-de-botella.html>
- IBM. (10 de 02 de 2000). IBM. En IBM, *IBM:Redes privadas virtuales de seguridad* (pág. 95). USA: IBM Corporation. Obtenido de Redes privadas virtuales de seguridad.
- ICONTEC. (septiembre de 2015). *NTC-ISO14001*. Recuperado el 22 de 05 de 2021, de https://informacion.unad.edu.co/images/control_interno/NTC_ISO_14001_2015.pdf
- IDEAM. (13 de 05 de 2019). Mesa de trabajo para la estructuración de SNRMC. *Mesa de trabajo para la estructuración de SNRMC*. Bogotá, Colombia.

- Meteosim. (27 de mayo de 2019). *Meteosim*. Obtenido de Influencia de la meteorología en la seguridad aérea: <https://meteosim.com/influencia-la-meteorologia-la-seguridad-aerea/>
- Munar, M., y Ramirez, P. (25 de octubre de 2021). Estrategias de Radar. (J. Agressoth, Entrevistador)
- OACI. (2016). *Normas y métodos recomendados internacionales* (Vol. 19). Montreal: OACI. Obtenido de <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-3.pdf>
- OACI. (23 de 09 de 2018). *IDEAM*. Obtenido de ANEXO 3: <http://www.ideam.gov.co/documents/24024/92354/OACI-ANEXO+3-ES.pdf/234797a8-2761-42bb-ac5f-139c0eb4d4e8>
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2007). *Telecomunicaciones Aeronáuticas* (Vol. 3). Montreal: OACI. Obtenido de <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-10-vol-iii.pdf>
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2013). *Telecomunicaciones aeronáuticos* (Vol. 5). Montreal: OACI. doi:978-92-9249-270-0
- RAE. (21 de 01 de 2022). *RAE*. Obtenido de <https://dle.rae.es/pitillo>
- Ramirez, A. (2013). *Comunicación por protocolo RS-232*. Puebla: Universidad Politécnica de Puebla.
- Rauber, R. M., & Nesbitt, S. W. (2018). *Radar Meteorology - A first course*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Rinehart, R. E. (2007). *El radar para los meteorólogos*. Columbia: Rinehart Publications.
- Rosengaus, M. (1995). Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda parte). *Ingeniería hidráulica en México*, 10(2), 59. Obtenido de http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1232/RIH_034.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Semana, R. (20 de 12 de 2011). Colombia adquiere radar meteorológico de precisión. Bogotá, Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://www.semana.com/colombia-adquiere-radar-meteorologico-precision/142129/>
- Sepúlveda, J. (2016). Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58046>
- Sokol, Z., Szturc, J, Orellana, A., Popová, J., Jurczyk, A., y Célleri, R. (2021). The Role of Weather Radar in Rainfall Estimation and Its Application in Meteorological and Hydrological Modelling—A Review. *Remote Sensing*, 13(3), 351. doi:<https://doi.org/10.3390/rs13030351>
- UAEAC. (24 de 09 de 2020). *Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil*. Obtenido de Organigrama: <https://www.aerocivil.gov.co/aerocivil/organigrama>
- Unidad Administrativa Especial Aeronáutica Civil. (junio de 2020). *Aerocivil*. Recuperado el 5 de mayo de 2021, de <https://www.aerocivil.gov.co/normatividad/transporte-aereo>

- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (agosto de 2018). *Aerocivil*. Recuperado el 20 de mayo de 2021, de RAC 203: <https://n9.cl/aerocivil>
- Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (marzo de 2020). *RAC 210*. Obtenido de <https://n9.cl/rac210>
- Universidad Politecnica de Catalunya. (s.f.). *Tipo de Radares meteorológicas*. Recuperado el 6 de mayo de 2021, de http://www.crahi.upc.edu/curs/html_pages/trasp3.html
- Vaisala. (2019). *Capacitación sobre Hardware WRM200*. Finlandia: Vaisala OYJ.
- WMO. (2018). Capítulo 7 - Mediciones de Radar. En WMO, *Parte II - Sistemas de Observación* (pág. 81). UK: WMO (14). Obtenido de https://nam10.safelinks.protection.outlook.com/?url=https%3A%2F%2Flibrary.wmo.int%2Findex.php%3Fflv1%3Dnotice_display%26id%3D20087%23.YPGVWegzaUn&data=04%7C01%7Cjassir.agressoth%40aerocivil.gov.co%7Caf95d924a73a4e36a62908d948781807%7C292755c0f07b4b91bb6e87
- Xunta de Galicia. (2021). *Meteogalicia*. Recuperado el 01 de junio de 2021, de https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/meteo/docs/observacion/radar/radar_es.pdf
- Yeary, M., Cheong, B., Kurdzo, J., Yu, T., y Palmer, R. (2014). A brief overview of weather radar technologies and instrumentation. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 17(5), 10-15. doi:10.1109/MIM.2014.6912194
- Zhong, L., Zhang, Z., Chen, L., Yang, J., y Zou, F. (2016). Application of the Doppler weather radar in real-time quality control of hourly gauge precipitation in eastern China. *Elsevier*, 172-173(1), 109. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.12.016>

10. Anexos

Anexo 1. Asistencia charla de radares

		LISTA DE ASISTENCIA				CÓDIGO: E-SGI-F001	
						VERSIÓN: 03	
						FECHA: 02/05/2017	
						PÁGINA: 1 de 1	
Tema de la Reunión:		Transferencia de conocimiento en radares de IDEAM a Aerocivil para el diseño de las estrategias de operación de los radares meteorológicos de Aerocivil					
Dependencia y/o Grupo Responsable:		OSPA			Funcionario responsable:		
Lugar		Virtual			Fecha:	09-09-2021	Hora: 10:00 am
No.	NOMBRES Y APELLIDOS	CARGO	DEPENDENCIA	TELÉFONO-EXTENSIÓN	CORREO ELECTRÓNICO	FIRMA	
1	William Materno Munar	Contralista	OSPA	3023249446	wmunar@ideam.gov.co	WMM	
2	Paul Sebastian Ramirez Hernandez	Contralista	OSPA	3208732844	psramirez@ideam.gov.co	PSRH	
3	Jassir Agressoth Cardona	Pasante Aerocivil	UAEC	3106809271	jassir.agressoth@aerocivil.gov.co	Jassir A.	
4							

Anexo 2. Carta de reconocimiento y aprobación por la realización de la mejora operativa

REPÚBLICA DE COLOMBIA
AERONÁUTICA CIVIL
Unidad Administrativa Especial



Bogotá D.C., 03 de febrero de 2022

Señores
FACULTAD TECNOLÓGICA
Proyecto curricular de Ingeniería en Telecomunicaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
tecelectronica@udistrital.edu.co

ASUNTO: Cumplimiento por Mejora Operativa al Radar Meteorológico Vaisala WRM200 del sector Tablazo

Cordial saludo,

La Dirección de Telecomunicaciones y Ayudas a la Navegación y la Coordinación del Grupo de Sistemas para Meteorología Aeronáutica de la Unidad Administrativa Especial de Aeronautica Civil – Aerocivil, da un especial reconocimiento a **JASSIR SNEIDER AGRESSOTH CARDONA**, estudiante de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el cumplimiento al excelente trabajo realizado sobre la Mejora Operativa al Radar Meteorológico WRM200 del sector Tablazo, la cual fue implementada en el servicio de la información Meteorológica para la Seguridad Aérea

Dentro de las funciones realizadas por el pasante se desarrolló e implementó una configuración sobre el Radar Meteorológico que sirvió de ayuda a la Navegación Aérea en Colombia. La Aerocivil con base en el trabajo presentado continuará investigando y apoyando el desarrollo de la información Meteorológica para el país.

Por tal motivo, se expresa la satisfacción por parte de la Entidad por el trabajo desarrollado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas a través del Pasante ya que se cumplieron los compromisos adquiridos para alcanzar este fin.

Por lo anterior, se da visto bueno para que se continué con el proceso de Trabajo de Grado del estudiante.

Cordialmente,

Director de Telecomunicaciones y
Ayudas a la Navegación Aérea

Coordinador del Grupo de Sistemas de
Meteorología Aeronáutica

Asesor/Director Trabajo de Grado de

Anexo 3. Certificado en Taller de Seguridad de la Aviación Civil



AERONÁUTICA CIVIL
UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL



Ares
Security Ltda.



CEA
Centro de Estudios Aeronáuticos
Institución Universitaria

Otorgan el presente
Certificado a:

Jassir sneider Agressoth Cardona

Identificado(a) con CC.: 1030686753

Quien asistió al Taller
**CULTURA DE LA SEGURIDAD DE LA AVIACIÓN CIVIL /
THE YEAR OF SECURITY CULTURE (YOSC)**

Colombia, 2021



JORGE IVÁN SEPULVEDA
Jefe del Centro de Estudios Aeronáuticos



GUILLERMO A. PARDO H.
Área Security



CLAUDIA LILIANA OLARTE CHARRY
Directora de Estándares de Servicios a la
Navegación Aérea y Servicios Aeroportuarios



SEGURIDAD
2021 AÑO DE LA CULTURA
DE LA SEGURIDAD

2021 | THE YEAR OF SECURITY CULTURE

Anexo 4. Convenio de cooperación meteorológica AMVA e IDEAM



**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO DE COOPERACIÓN TÉCNICA No. 389 DE 2010
CELEBRADO ENTRE LA UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE AERONÁUTICA CIVIL
Y EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DEL ABURRÁ.**

Entre los suscritos, **FERNANDO SANCLEMENTE ALZATE**, mayor de edad vecino de Bogotá, D.C, identificado con la cédula de ciudadanía número 80.407.418 de Usaqué, obrando en su condición de Director General y Representante Legal **DE LA UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE AERONÁUTICA CIVIL- AEROCIVIL**, con base a las facultades que le otorga el Decreto 260 del 28 de enero de 2004 artículo 9, nombrado mediante Decreto N° 998 del 1 de abril de 2005 y Acta de Posesión N° 810 de 11 de abril de 2005, entidad especializada de carácter técnico adscrita al Ministerio de Transporte, con personería jurídica, autonomía administrativa y patrimonio independiente, quien para los efectos de este convenio interadministrativo de cooperación se denominará **LA UNIDAD**, por una parte y **ALEJANDRO GONZÁLEZ VALENCIA**, identificado con cédula de ciudadanía No. 8.430.073 de Medellín, en su calidad de Subdirector Ambiental, nombrado mediante Acta 05 de 2009 de la Junta Metropolitana, y posesionado según acta 288 de 2009, quien obra en nombre y representación de **EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DEL ABURRÁ**, en los términos de la Ley 128 de 1994, y la Resolución Metropolitana No. 1142 de 2009, los Acuerdos Metropolitanos 04 de 2007 y 031 de 2009, y quien se denominará **EL ÁREA**, por la otra parte, hemos acordado suscribir el presente Convenio interadministrativo de cooperación técnica, previas las siguientes consideraciones: **1)** Que el artículo 2° de la Constitución Nacional, establece que "Son fines esenciales del Estado: servir a la comunidad, promover la prosperidad general y garantizar la efectividad de los principios, derechos y deberes consagrados en la Constitución. (...)". **2)** Que el artículo 6° de la Ley 489 de 1998 prescribe: "En virtud del principio de coordinación y colaboración, las autoridades administrativas deberán garantizar la armonía en el ejercicio de sus respectivas funciones con el fin de lograr los fines y cometidos estatales. En consecuencia, prestarán su colaboración a las demás entidades para facilitar el ejercicio de sus funciones y se abstendrá de impedir o estorbar su cumplimiento por los órganos, dependencias, organismos y entidades titulares" **3)** Que el artículo 95 de la Ley 489 de 1998, en su primer inciso autoriza a las entidades públicas su asociación entre sí, con el propósito de cooperar en el cumplimiento de funciones administrativas, todo ello acatando el deber de coordinación de las actuaciones de las autoridades administrativas para el cumplimiento de los fines del Estado. **4)** Que conforme a lo señalado en el artículo 2° del Decreto 260 de 2004, **LA UNIDAD** es la autoridad en materia aeronáutica del territorio nacional y le compete regular, administrar, vigilar y controlar el

**UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE AERONÁUTICA CIVIL
CONVENIO INTERADMINISTRATIVO NUMERO**


Técnico. **PARÁGRAFO:** Para no afectar la prestación de los servicios que hoy viene realizando el IDEAM y hasta el momento en el cual el comité Directivo apruebe los anexos que redefinan la prestación de estos servicios, los servicios se seguirán rigiendo por lo pertinente del convenio del 5 de Marzo de 1.990, dichos anexos deberán estar vigentes a mas tardar un año a partir de la firma del presente. **CLÁUSULA DÉCIMA CUARTA: PLAZO DE EJECUCIÓN:** El plazo de ejecución del presente convenio es de cinco años, contados a partir de la firma del mismo. **PARÁGRAFO:**

Para efectos de la presente cláusula si ninguna de las partes manifiesta su intención de darlo por terminado con una antelación no inferior a **TRES (3) MESES** el presente convenio se entenderá prorrogado automáticamente por periodos de **un (1) año**.

CLÁUSULA DÉCIMA QUINTA: DOMICILIO Y NOTIFICACIONES: Las notificaciones que cualquiera de las partes desee hacer a la otra, deben formularse por escrito a las siguientes direcciones: A la UAEAC en el aeropuerto el Dorado, Dirección General cuarto piso, Bogotá D. C., al IDEAM a la Dirección General del Instituto, Diagonal 97 N° 17-60 PISO 7, Bogotá D. C., Colombia. **CLÁUSULA DÉCIMA SEXTA:**

PERFECCIONAMIENTO DEL CONTRATO: Siendo las partes que suscriben este convenio entidades de derecho público, están exentas de impuesto de timbre nacional y registro. Por otra parte se prescinde de las causales de caducidad administrativa y garantías de cubrimiento. El presente convenio se perfecciona con el acuerdo de voluntades entre las partes que se manifiesta con la suscripción del mismo. Se firma en la ciudad de Bogotá, D. C., a los veintiún (21) días del mes de mayo de 2.002.

LA AEROCIVIL


JUAN CARLOS VÉLEZ URIBE
Director General UAEAC

EL IDEAM


CARLOS CASTAÑO URIBE
Director General IDEAM

Anexo 5. Participación como ponente en el primer encuentro de investigación de TECRED

**PRIMER
ENCUENTRO DE
INVESTIGACIÓN**



Jassir Agressoth
Cardona



**PROYECTO DE MEJORA TÉCNICA DEL
RADAR METEOROLÓGICO WRM200
DE LA AERONÁUTICA CIVIL**
Experiencias de Investigación

Tecnología en Electrónica Industrial
Universidad Distrital Francisco José de
Caldas

Jueves 11 de noviembre de 2021
Facebook/**Tecnología Electrónica UD**
6:00pm