



Facultad de Matemática,
Astronomía, Física y
Computación



Desarrollo e Implementación de una Biblioteca de Procesamiento de Datos de Nivel 1 de Radares Meteorológicos

por

Jorge Nicolás Saffe

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de “Especialista en
Sistemas de Radar e Instrumentación” de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

2020/07

Director: Dr. Giorgio Caranti (FAMAFA - UNC)

Tribunal Especial:

Esp. Ing. Marcela Busnardo (IUA - UNDEF)

Mg. Ing. José Amado (FCEFyN - UNC)

Dr. Ing. Guillermo Riva (FCEFyN - UNC)



*Desarrollo e Implementación de una Biblioteca de Procesamiento de Datos de
Nivel 1 de Radares Meteorológicos por [Jorge Nicolas Saffe](#) se distribuye bajo una
[Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0
Internacional](#).*

RESUMEN

En este trabajo integrador de especialización se llevó a cabo el desarrollo e implementación de una biblioteca de procesamiento de Datos de Nivel 1 de Radares Meteorológicos. Las funcionalidades implementadas abarcan desde la decodificación de los archivos de Nivel 1 (IQ) hasta la generación, visualización y almacenamiento de variables polarimétricas de Nivel 2. Como caso de aplicación se llevó a cabo una prueba de calibración electrónica del Radar Meteorológico Argentino 1 (RMA-1).

ABSTRACT

In this integrative specialization work, the development and implementation of a Level 1 Data processing library for Weather Radars was carried out. The implemented functionalities range from decoding Level 1 files (IQ) to the generation, visualization, and storage of Level 2 polarimetric variables. As a case study, an electronic calibration test of the Argentine Weather Radar 1 (RMA-1) was conducted.



Índice general

1	Introducción	6
2	Radars Meteorológicos: Principios de Funcionamiento	8
2.1	Arquitectura y Subsistemas de Radars Meteorológicos	9
2.2	Estrategias de Operación	13
2.2.1	Parámetros Generales y Particulares	13
2.2.2	Lógica de Agrupamiento de Datos	14
2.2.3	Parámetros de los Pulsos	16
2.3	Ecuación de Radar Meteorológico	18
2.3.1	Ecuación de Radar: Blanco Puntual	18
2.3.2	Ecuación de Radar: Blanco Distribuido	18
2.4	Factor de Reflectividad Horizontal y Vertical	20
2.5	Variables Polarimétricas	22
2.5.1	Factor de Reflectividad Diferencial	22
2.5.2	Coefficiente de Correlación Co-Polar	24
2.5.3	Fase Diferencial y Fase Diferencial Específica	26
2.5.4	Velocidad Doppler y Ancho Espectral	27
3	Biblioteca de Procesamiento de Datos de Nivel 1	32
3.1	Datos de Nivel 1	32
3.1.1	Arquitectura de Almacenamiento	33

3.2	Estimadores de Momentos Espectrales y Variables Polarimétricas	33
3.2.1	Factor de Reflectividad, Velocidad Doppler y Ancho Espectral	33
3.2.1.1	Potencia de la Señal y Factor de Reflectividad Horizontal y Vertical	34
3.2.1.2	Velocidad Doppler Media	34
3.2.1.3	Ancho Espectral	35
3.2.2	Variables Polarimétricas	36
3.3	Biblioteca de Procesamiento de Datos N1	37
3.3.1	Arquitectura de la Biblioteca	37
3.3.2	Lector de Archivos IQ	38
3.3.3	Agrupamiento de Pulsos	38
3.3.3.1	Agrupamiento Secuencial de Pulsos	38
3.3.3.2	Caso RMA: Aspectos de Implementación a Considerar.	39
3.3.3.3	Agrupamiento Acimutal de Pulsos	40
3.3.4	Procesamiento de Barridos	42
3.3.4.1	Procesador SinglePRF	42
3.3.4.2	Modo de Procesamiento Automático	44
3.3.4.3	Paralelización	44
3.3.4.4	Integración de Celdas	46
3.4	Filtrado de Datos de Nivel 2	46
3.4.1	Filtrado de Ruido y Ecos No Meteorológicos	46
3.4.2	Filtrado de Interferencias	47
3.5	Almacenamiento de Datos N2	48
4	Calibración Electrónica Absoluta de un Radar Meteorológico	50
4.1	Métodos de Calibración Absoluta	50
4.2	Conceptos Teóricos	51
4.2.1	Constante de Radar	51
4.2.2	Z teórico del blanco de calibración	52
4.3	Procedimientos para el Procesamiento de Datos	53
4.4	Calibración Electrónica Absoluta del RMA-1	55
4.4.1	Blancos de Calibración	55
4.4.2	Medios de Elevación	56
4.4.3	Análisis del Mapa de Clutter del RMA1.	58
4.4.4	Evaluación y Selección de Sitios	60
4.4.5	Descripción de la Prueba	62
4.4.5.1	Procedimiento General	62
4.4.5.2	Descripción de Etapas	62

4.4.6	Diseño de la Estrategia de Radar	66
4.4.7	Pruebas Experimentales	70
4.4.7.1	1º Prueba de Calibración: Ensayo Preliminar	71
4.4.7.2	2º Prueba de Calibración	72
4.4.7.3	Resultados	75
4.5	Calibración Electrónica Dinámica con Blancos Estáticos	77
4.5.1	Procedimientos para el Procesamiento de Datos	77
4.5.1.1	Procedimiento de Inicialización	77
4.5.1.2	Procedimiento de Calibración Dinámica	78
4.5.2	Detección de Blancos Estáticos de Alta Reflectividad	79
4.5.3	Verificación de Metodología	81
5	Conclusiones y Trabajo Futuro	83
5.1	Conclusiones	83
5.2	Trabajo Futuro	84
A	Calibración Electrónica	85
B	Especificaciones Técnicas RMA	88
	Referencias	91
	Acrónimos	92



1. Introducción

El presente trabajo de especialidad tiene como objeto principal el desarrollo de una biblioteca de software capaz de procesar los Datos o productos de Radar de Nivel 1 (N1) de los Radares Meteorológicos Argentinos (RMAs), fabricados por la empresa Investigaciones Aplicadas S.E. (INVAP). Considerando que el fabricante no comercializa por separado el software de procesamiento de datos del RMA, actualmente no existe ningún paquete de software, libre o comercial, que pueda procesar datos N1 de dichos instrumentos. La imposibilidad de contar con una herramienta de esta naturaleza limita la explotación de los datos registrados y, por lo tanto, de las capacidades y potencialidad de uso de dicho instrumento.

El Sistema Nacional de Radares Meteorológicos (SiNaRaMe) conformado, entre otros sensores remotos, por 11 radares RMA está diseñado para proveer a los usuarios finales únicamente Datos o productos de Radar de Nivel 2 (N2), los cuales son el resultado de distintos procesamientos estadísticos aplicados a los datos N1. El problema es que muchos fenómenos atmosféricos, eventos no-meteorológicos o anomalías no pueden ser explicados utilizando únicamente datos N2.

La disponibilidad de un paquete de procesamiento de datos N1 permitirá que usuarios especializados de distintos puntos del país puedan explotar la potencialidad de los radares argentinos RMA. Este podrá utilizarse para investigación, análisis detallados de tormentas, desarrollo de nuevos productos N2, entre muchos otros posibles usos.

En particular, una de las posibles aplicaciones del software que motivó principalmente este trabajo, es la posibilidad de realizar una calibración electrónica absoluta del RMA. Actualmente la constante de radar de estos instrumentos es ajustada utilizando la técnica de calibración solar, la cual depende de mediciones externas y de procesamientos estadísticos.

Contenido del Trabajo

En el capítulo 2 se comienza realizando una revisión teórica sobre el principio de funcionamiento de los radares meteorológicos, repasando conceptos de arquitectura y aspectos de ingeniería de los radares meteorológicos modernos, estrategias de operación, ecuaciones de radar y definición de las distintas variables polarimétricas.

En el capítulo 3 se describe inicialmente la estructura de los datos N1, luego se desarrollan las expresiones de los estimadores de momentos espectrales y variables polarimétricas a implementar y, finalmente, se detalla la arquitectura y descripción pormenorizada del paquete de software.

El capítulo 4 muestra un caso de uso del software desarrollado. En este se comienza introduciendo los distintos métodos de calibración absoluta existentes, se continúa con una revisión de conceptos teóricos, luego se describe el diseño de las pruebas de campo y se detallan las pruebas experimentales realizadas con los respectivos resultados obtenidos en relación la calibración electrónica del Radar Meteorológico Argentino 1 (RMA-1). El capítulo concluye presentando un nuevo método de calibración dinámica a partir de la medición de construcciones antropogénicas ubicadas en las proximidades del radar.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y posibles trabajos futuros.



2. Radares Meteorológicos: Principios de Funcionamiento

El término radar proviene del acrónimo “Radio Detection and Ranging” del idioma inglés, o sea “Detección y Medición de Distancias por Radio”. Los radares son dispositivos que se utilizan para la detección, localización y caracterización de objetos por medio de la transmisión y recepción de microondas.

Los objetos factibles de ser detectados varían en un amplio rango de tamaños. En el caso de los radares meteorológicos el objetivo del instrumento no es medir blancos puntuales sino blancos distribuidos en la atmósfera como fenómenos meteorológicos de micro y mesoescala.

La detección y caracterización de hidrometeoros se realiza mediante el efecto de retrodispersión que experimenta el haz de microondas, pulso u onda electromagnética emitido por el radar al interactuar con las partículas atmosféricas en suspensión. Las mediciones observadas son el resultado de la interacción de la totalidad de las partículas presentes en los distintos volúmenes de resolución. Finalmente, luego de la interacción de la onda electromagnética con las partículas en suspensión, la señal recibida es amplificada, filtrada, digitalizada, procesada y almacenada para su posterior análisis.

El panel izquierdo de la Figura 2.1 ilustra dos volúmenes de resolución dentro de un pulso de radar, mientras que en el panel derecho se esquematiza la interacción de estos con distintos tipos de hidrometeoros comúnmente presentes en la atmósfera.

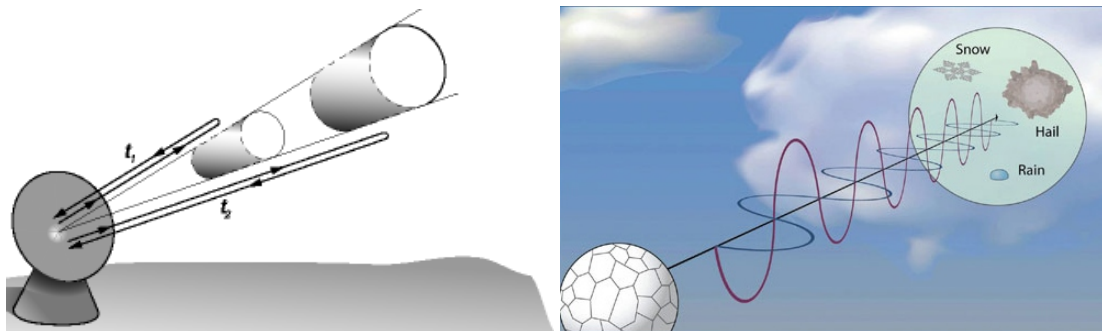


Figura 2.1: (Izq) Diagrama de dos volúmenes de resolución de un pulso de radar. (Der) Ilustración de la interacción de un pulso electromagnético con distintos tipos de hidrometeoros. Gráfica extraída de National Weather Service, 2019b.

Los radares utilizan naturalmente un sistema de coordenadas esférico para la adquisición y almacenamiento de los datos. Esto se debe a que la antena, y por lo tanto el lóbulo de radiación principal, es posicionado típicamente mediante dos ejes de rotación, uno girando en acimut y el otro en elevación. El rango o la distancia al blanco es la tercer componente del sistema de coordenadas y se obtiene de forma indirecta mediante la medición del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de un pulso determinado.

La Figura 2.2 ilustra un pulso electromagnético ingresando al núcleo de una tormenta. En esta se puede apreciar el sistema de coordenadas del radar, el efecto que produce la curvatura de la tierra en las mediciones de fenómenos atmosféricos a grandes distancias y el ensanchamiento del lóbulo principal de la antena en función del rango.

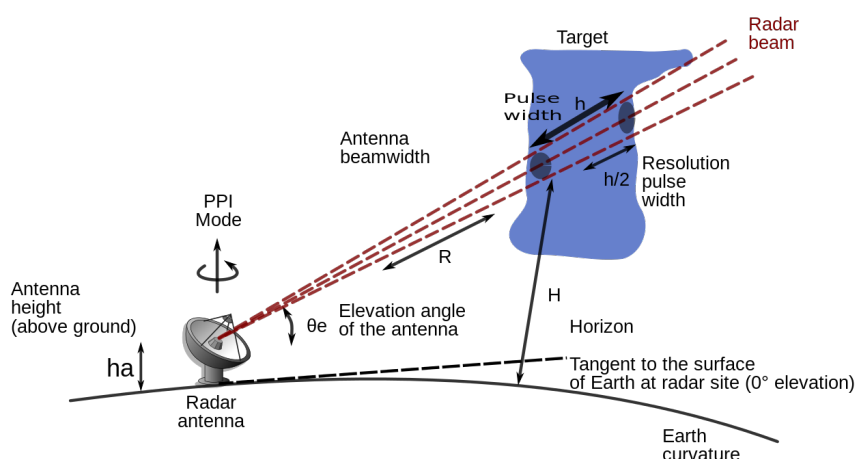


Figura 2.2: Ilustración de un pulso electromagnético interactuando con una nube.

Los radares meteorológicos modernos como el RMA, el Radar Meteorológico de Vigilancia-88D (WSR-88D, por sus siglas en Inglés "Weather Surveillance Radar-1988 Doppler"), el Terminal Doppler Weather Radar (TDWR), entre otros, cuentan con tecnología doppler y doble polarimétrica. Esto es, el aprovechamiento del efecto doppler en los radares permite medir la velocidad media de las partículas en los distintos volúmenes de resolución, mientras que la doble polarimetría implica que los radares transmitan y reciban microondas, alternada o simultáneamente, en dos polarizaciones lineales ortogonales, denominadas comúnmente horizontal y vertical. El carácter doble polarimétrico del radar permite no solo identificar la presencia de hidrometeoros sino también su tipo, forma y concentración.

2.1 Arquitectura y Subsistemas de Radares Meteorológicos

Los radares meteorológicos son sistemas complejos integrados comúnmente por una serie de subsistemas que funcionan coordinadamente a los fines de realizar el sensado remoto de la atmósfera. Los subsistemas que tradicionalmente componen estos instrumentos son:

- Antena:
 - Reflector Parabólico.
 - Duplexor.
 - Pedestal.
 - Guías de Onda.
 - Juntas Rotativas.
 - Radomo Protector.
- Transmisión

- Recepción Analógica
- Recepción Digital
- Procesamiento de Señales
- Almacenamiento
- Comunicaciones

El diseño de los radares modernos está basado comúnmente en arquitecturas modulares, donde los distintos módulos o subsistemas son interconectados por medio de una red de comunicaciones para compartir datos, señales de control y sincronismo. Los subsistemas están generalmente equipados con uno o más sensores dedicados a la telemetría de sus componentes. De esta forma, el monitoreo, la operación y mantenimiento del radar puede ser efectuada de manera local o remota. Incluso es factible realizar estas tareas de forma segura a través de una red global como internet mediante la utilización de conexiones o redes cifradas de tipo Red Privada Virtual (VPN, por sus siglas en Inglés "Virtual Private Network").

Los mecanismos de transmisión y recepción de potencia, canalizados mediante guías de onda, han sido optimizados en los diseños modernos de radares meteorológicos. En estos se reducen los trayectos de guías de onda a la menor distancia posible, tendiendo a instalar los subsistemas de recepción analógicos/digitales muy próximos a la antena del radar. Inclusive muchos radares modernos integran varios de estos subsistemas en el pedestal de soporte del reflector. Esta aproximación permite reducir considerablemente las pérdidas de potencia y ruido en la transmisión y recepción de las señales de Radio Frecuencia (RF).

En la etapa de recepción analógica la señal de RF es recibida a frecuencia de portadora, inmediatamente es trasladada a una frecuencia menor, denominada comúnmente Frecuencia Intermedia (FI), y luego es muestreada y digitalizada en la etapa de recepción digital. La digitalización de la señal simplifica y dinamiza el procesamiento de los datos, permite su almacenamiento, reduce errores y baja costos de implementación y actualizaciones. La transmisión de dichos datos requiere generalmente de enlaces dedicados de alta velocidad entre los módulos encargados de la digitalización, procesamiento y almacenamiento.

Los radares meteorológicos operativos requieren de tiempos de disponibilidad superiores al 95 % ya que, entre sus distintas aplicaciones, son usados regularmente para detectar eventos meteorológicos severos que pueden afectar a la población. A dicho fin los radares son equipados con sistemas de redundancia eléctrica y electrónica. Los subsistemas electrónicos suelen estar alimentados mediante fuentes de energía redundantes y protegidos con Sistema de Alimentación Ininterrumpible (UPS, por sus siglas en Inglés "Uninterruptible Power Supply"). Adicionalmente, el suministro energético de la red pública es respaldado por generadores eléctricos autónomos.

Un diagrama genérico simplificado de un radar meteorológico se ilustra en la Figura 2.3, mientras que un diagrama de un radar operativo puede verse en Rauber y Nesbitt, 2018 [pág.25, Figura 2.1] correspondiente al Radar Polarimétrico Banda S (S-Pol, por sus siglas en Inglés "Polarimetric S Band Radar") de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. (NSF, por sus siglas en Inglés "National Science Foundation")/Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE.UU. (NCAR, por sus siglas en Inglés "National Center for Atmospheric Research").

Subsistemas de Transmisión, Recepción Analógica y Digital

El *subsistema de transmisión* es el encargado de generar los pulsos de microondas de alta potencia empleados para el sensado remoto de la atmósfera, donde las 3 tecnologías más comúnmente empleadas son: "Magnetron", "Klystron" y "Dispositivos de Estado Sólido". En el caso de los radares meteorológicos, la frecuencia de operación suele ubicarse dentro de las bandas electromagnéticas X, C o S, y la transmisión se realiza utilizando formas de onda pulsada.

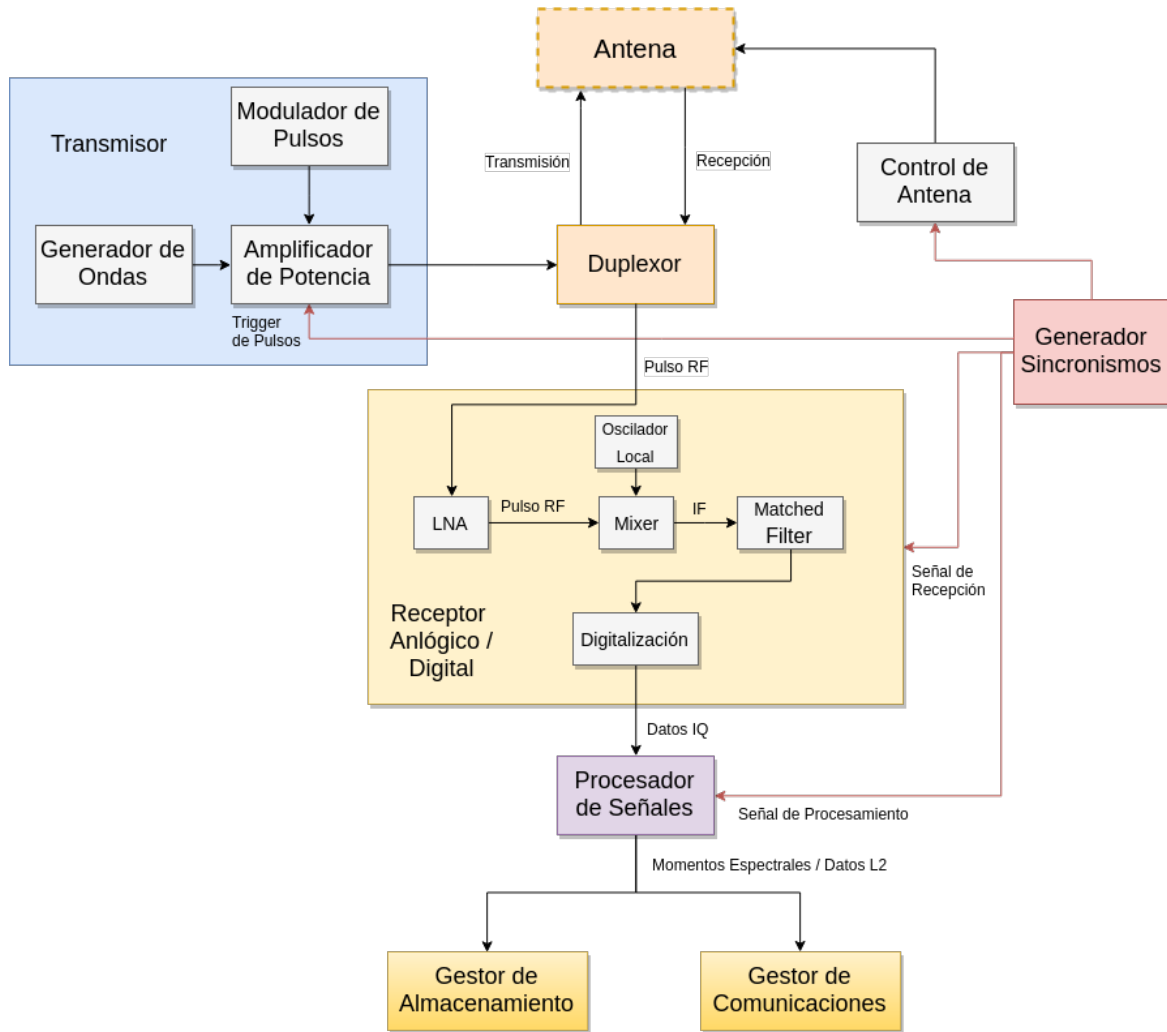


Figura 2.3: Diagrama general simplificado de un radar meteorológico.

El **receptor analógico** es el encargado de recibir la señal de RF proveniente de la antena, filtrarla, amplificarla y trasladarla a FI, lo cual suele ser realizado en dos etapas utilizando receptores superheterodinos. La frecuencia intermedia interna se suele fijar entre los 50 y 90MHz.

Los **receptores digitales** son los encargados de la digitalización y adaptación de las señales de FI. Éstos están compuestos por Conversores Analógicos-Digitales (ADC, por sus siglas en Inglés "Analog Digital Converters"), diversos filtros, etapas de procesamiento digital como Digital Down Conversions (DDCs), decimación, etc; implementados mediante circuitos electrónicos ad hoc y/o circuitos electrónicos programables como los Field-programmable Gate Arrays (FPGAs). A los datos digitalizados en banda base de las Señales en Fase y Cuadratura (IQ) de la FI se les agrega una cabecera que identifica unívocamente el pulso originante. Esta nueva unidad de información es denominada comúnmente como datos de Nivel 1 (N1 o L1 por el acrónimo en Inglés de 'Level One') o IQ.

Unidades de Procesamiento y Almacenamiento

La **unidad de procesamiento**, mediante la utilización de estimadores estadísticos, realiza la transformación de los datos N1 a los distintos momentos espectrales, variables polarimétricas o productos de Nivel 2 (N2 o L2 por el acrónimo en Inglés de 'Level Two') (ver secciones 2.4 y 2.5). Posteriormente, los productos resultantes suelen ser filtrados para eliminar o mitigar efectos de ruido, clutter e interferencias, entre otros.

Los cálculos implicados en el procesamiento se ajustan a un problema de paralelismo de datos y, por lo tanto, es frecuentemente resuelto utilizando técnicas de procesamiento paralelo implementadas en clúster de computadoras de alto desempeño o Unidades de Procesamiento Gráfico de Propósito General (GPGPUs, por sus siglas en Inglés "General Processing Graphic Processor Units").

Los productos N2 generados durante esta etapa son codificados utilizando formatos propietarios o estándares abiertos como el Formato Binario Universal para la Representación de Información Meteorológica (BUFR, por sus siglas en Inglés "Binary Universal Form for the Representation of Meteorological Data") o el Formato de Datos Comunes de Red (NetCDF, por sus siglas en Inglés "Network Common Data Form").

Un diagrama esquemático genérico de la cadena de procesamiento de un radar meteorológico se muestra en la Figura 2.4. En este se aprecia la interacción de los subsistemas de radar desde la recepción de los datos hasta la publicación de los productos de Nivel 3 (N3) para el usuario final.

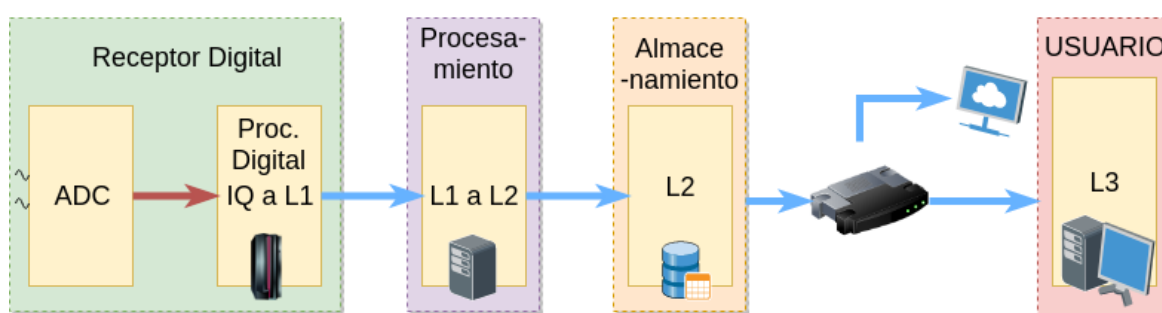


Figura 2.4: Diagrama esquemático genérico de la cadena de procesamiento de un radar meteorológico.

El *subsistema de almacenamiento* es el encargado de la disposición final de los archivos N2 generados por los radares. Estos suelen estar implementados mediante unidades de cómputo general con redundancia de almacenamiento (tipo Matriz Redundante de Discos Independientes (RAID, por sus siglas en Inglés "Redundant Array of Independent Disks")) o directamente en servidores dedicados de almacenamiento de datos.

Subsistemas de Sincronismo y Comunicaciones

La *unidad de sincronismo* es la encargada de coordinar el funcionamiento de todos los subsistemas del radar: desde la generación de los pulsos, pasando por la recepción analógica y digital de la información hasta su procesamiento.

La *red de comunicaciones* es la encargada de la interconexión de los distintos subsistemas de los radares. La misma sirve para transferir las señales de sincronismo, mensajes de control, señales de monitoreo y realizar la transferencia de datos de Nivel 1 y 2.

Radomo, Reflector, Pedestal y Junta Rotativa

El *radomo* es un elemento muy importante en un radar meteorológico ya que protege a la antena de las inclemencias climáticas. Está conformado por una serie de paneles individuales, los cuales son fabricados con materiales compuestos y cuyas geometrías están especialmente diseñadas para minimizar el efecto de los mismos sobre las señales emitidas o recibidas por el radar. La Figura 2.5 ilustra el radomo y la torre reticulada del RMA-1.

Las dimensiones del *reflector* están directamente relacionadas a la precisión angular que se desea obtener y a la frecuencia de operación del radar. A menores frecuencias de operación mayor es el diámetro requerido para alcanzar una precisión angular determinada.

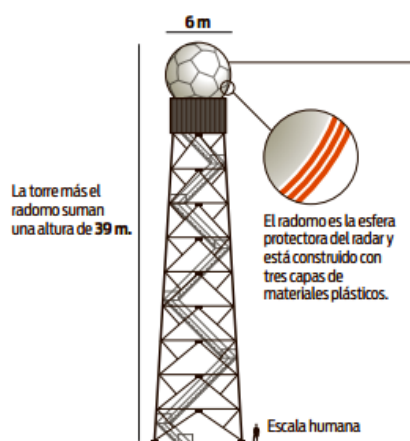


Figura 2.5: Ilustración de un radomo montado sobre una torre reticulada. Gráfica extraída de “Diario La Voz del Interior”.

El *pedestal* es el encargado de soportar y movilizar el reflector. Determina tanto las velocidades de rotación, la precisión de apuntamiento en acimut y elevación como los límites del desplazamiento vertical del reflector. Este último suele abarcar generalmente desde ángulos negativos hasta 90° o incluso ángulos superiores. La *junta rotativa*, finalmente, es el mecanismo encargado de transferir las señales de RF provenientes del transmisor (canalizadas a través de guías de onda) y otras señales de control y sincronismo (transmitidas mediante cables de cobre) a través de la base rotante del pedestal.

En el Apéndice B: ‘Especificaciones Técnicas RMA’ se resumen las características de los principales subsistemas del RMA, instrumento utilizado para el desarrollo del presente trabajo. Adicionalmente, a modo comparativo, en Doviak y Zrníc, 1993 [Pág.47, Tabla 3.1] pueden verse las características del WSR-88D, instrumento principal de la Red operativa de radares meteorológicos de EE.UU. (NEXRAD, por sus siglas en Inglés "Next Generation Radar Network").

2.2 Estrategias de Operación

2.2.1 Parámetros Generales y Particulares

La estrategia de operación define los parámetros de funcionamiento de los distintos subsistemas, regulando desde el movimiento de la antena, las propiedades de los pulsos emitidos y hasta el tipo de procesamiento realizado sobre los datos. En esta se definen una serie de parámetros generales, comunes a todo el patrón de cobertura volumétrico, y parámetros particulares propios de cada barrido.

Los *parámetros generales* son:

- **Tipo de Estrategia de Escaneo:**
 - Indicador de Posición Plano (PPI, por sus siglas en Inglés "Plan Position Indicator")
 - Indicador de Altura y Rango (RHI, por sus siglas en Inglés "Range Height Indicator")
 - Otros modos propios del radar.
- **Tamaño de Integración de Celdas** típicamente desde 50 m.
- **Número de Barridos:** desde 1 hasta el máximo soportado por el radar.

Los *parámetros particulares* de cada barrido son:

- **Tipo de Procesamiento:** Staggered, Dual-PRF, Doppler simple, etc.
- **Filtros Aplicables:** clutter, ruido, etc.
- **Ángulo de Elevación:** típicamente desde -5 a 90°.
- **Número de Pulsos:** número arbitrario limitado por la implementación del radar.

- **Ancho del Pulso:** típicamente de 200 ns a 4000 ns.
- **Período de Repetición entre Pulsos:** típicamente de 200 μs a 5000 μs
- **Alcance Máximo:** típicamente hasta 500 km.

2.2.2 Lógica de Agrupamiento de Datos

Pulsos

Los pulsos son la unidad mínima de información almacenada por los radares meteorológicos. Están constituidos por los datos IQ asociados a la transmisión de un pulso electromagnético, que luego de interactuar con la atmósfera, es recibido, digitalizado, procesado y demarcado con una cabecera unívoca. Los pulsos están subdivididos, a su vez, en celdas o volúmenes de resolución cuyo tamaño depende de la tasa de muestreo aplicada en la etapa de recepción, del ancho del pulso transmitido y del tamaño de integración de celdas configurado. La Figura 2.6 ilustra un pulso de radar y una celda particular con sus respectivas dimensiones.

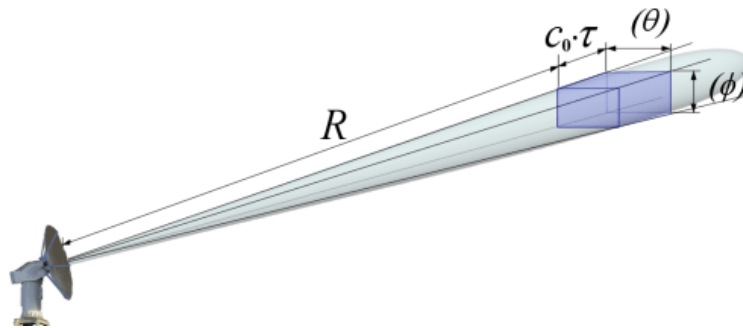


Figura 2.6: Ilustración de un pulso de radar. Se resalta en violeta una celda del mismo con sus respectivas dimensiones.

Grupo de Pulsos

Los grupos de pulsos constituyen la unidad mínima utilizada en el procesamiento de los momentos espectrales. Estos se componen de 2 o más pulsos transmitidos de forma sucesiva y comprenden un cierto sector acimutal. Este último se define típicamente por el número de pulsos integrantes del grupo, el ancho angular del lóbulo principal y la velocidad de giro de la antena.

Barridos

Los barridos están constituidos por una serie de grupos de pulsos tomados a una misma elevación o acimut, dependiendo del tipo de estrategia de escaneo elegida. Estos en conjunto abarcan un giro acimutal o vertical completo de la antena.

Barridos con Estrategia de Escaneo tipo PPI Los barridos tipo PPI emiten los sucesivos grupos de pulsos manteniendo fija una cierta elevación mientras la antena es rotada a velocidad constante en acimut. La cantidad de grupos de pulsos por barrido suele estar condicionada por la precisión angular de la antena. Por ejemplo, para un radar cuya antena tiene una precisión angular de un grado, un barrido tipo PPI estará constituido por 360 grupos de pulsos, cada uno con una cobertura acimutal de 1° .

El panel izquierdo de la Figura 2.7 muestra una representación simplificada de la cobertura volumétrica que realizarían los distintos pulsos comprendidos dentro de un barrido tipo PPI. En esta simplificación el recorrido de la antena está representado por un cono de revolución con vértice en el radar y eje de rotación vertical. Adicionalmente, la imagen muestra una proyección de los datos

sensados por el radar dentro de este cono de revolución sobre una superficie plana subyacente. A esta proyección de la información meteorológica sobre un plano se la conoce comúnmente como PPI. El panel derecho de la Figura 2.7, muestra un PPI de una tormenta particular coloreado en función del valor de la variable polarimétrica ilustrada.

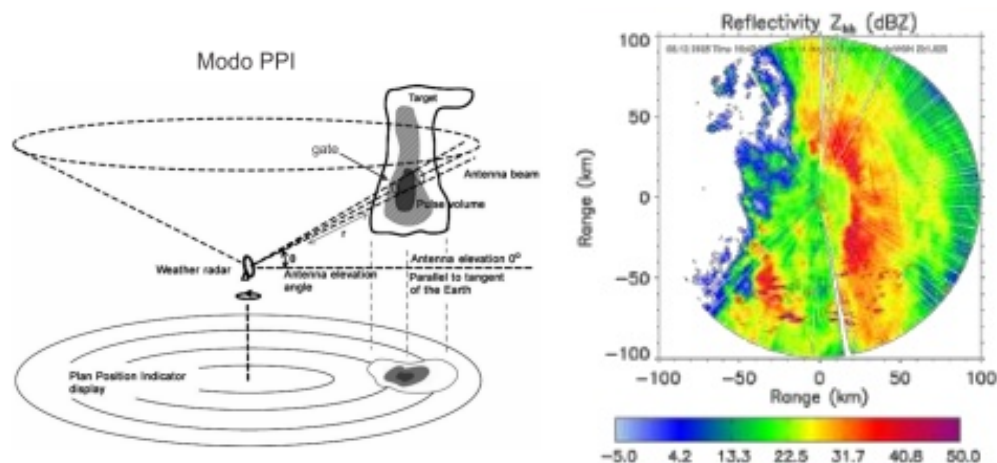


Figura 2.7: (Izq) Ilustración de la cobertura volumétrica de un barrido y su proyección sobre una superficie plana. (Der) Representación típica de un barrido con estrategia de escaneo tipo PPI. En la parte inferior se muestra la escala de colores utilizada para representar la intensidad del valor del Factor de Reflectividad Equivalente Horizontal (Z_h) (ver sección 2.4). Gráfica extraída de POLDIRAD (DLR, Oberpfaffenhofen, Alemania).

Barridos con Estrategias de Escaneo tipo RHI En un barrido tipo RHI todos los pulsos son tomados manteniendo la antena fija en una posición acimutal y desplazando la misma a velocidad constante en elevación. La cantidad de grupos de pulsos por barrido dependerá típicamente del sector del cielo que se desea muestrear.

El panel izquierdo de la Figura 2.8 ilustra la cobertura volumétrica de un barrido RHI, mientras que el panel derecho muestra la representación típica que suele utilizarse para visualizar conjuntos de datos de este tipo.

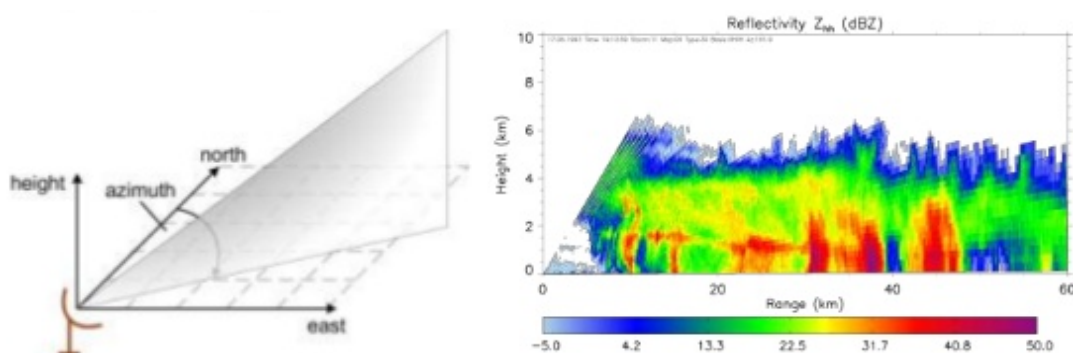


Figura 2.8: (Izq) Ilustración de la cobertura volumétrica de un barrido RHI. (Der) Representación de un conjunto de datos tipo RHI junto a la escala de colores utilizada para ponderar la intensidad de la variable polarimétrica graficada. Imagen extraída de POLDIRAD (DLR, Oberpfaffenhofen, Alemania).

Volúmenes

Los volúmenes definen un cierto patrón de cobertura volumétrica de la atmósfera y están constituidos por 2 o más barridos. El conjunto de datos resultantes permite realizar una reconstrucción parcial de los fenómenos atmosféricos presentes al momento de efectuar las mediciones. Una *estrategia de operación*, a su vez, puede estar definida por uno o más volúmenes. El panel izquierdo y derecho de la Figura 2.9 ilustran la cobertura espacial de volúmenes formados por barridos tipo PPI y RHI, respectivamente.

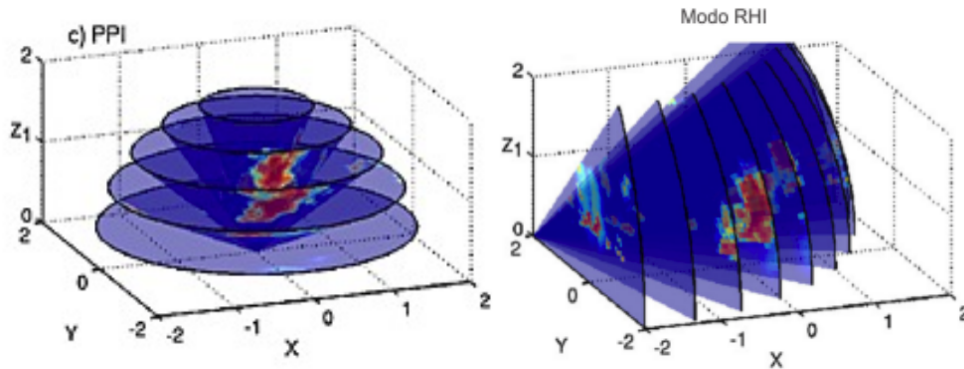


Figura 2.9: Ilustración de la cobertura volumétrica de volúmenes PPI y RHI, a la izquierda y derecha respectivamente.

2.2.3 Parámetros de los Pulsos

Período de Repetición entre Pulsos

El Período de Repetición entre Pulsos (PRP, por sus siglas en Inglés "Pulse Repetition Period"), equivalente a la inversa de la Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF, por sus siglas en Inglés "Pulse Repetition Frequency"), define el período entre la emisión de dos pulsos consecutivos. Los valores de PRP pueden variar típicamente entre $200 \mu s$ y $5000 \mu s$.

La modificación del valor de PRP tiene varias implicancias:

- **Velocidad Doppler No Ambigua:** mientras mayor es la frecuencia con la que se emiten los pulsos (menor PRP) mayor es la velocidad doppler no ambigua o velocidad de Nyquist que puede obtenerse. Las siguientes ecuaciones permiten calcular la velocidad doppler no ambigua máxima en función del PRP elegido y la longitud de onda (λ) del radar:

$$\pm V_a = \pm \frac{\lambda}{4 PRP} \quad (2.1)$$

$$\pm V_a = \pm \frac{\lambda}{4 (PRP_{max} - PRP_{min})} \quad (2.2)$$

donde la Ecuación (2.1) se utiliza para barridos donde todos los grupos de pulsos tienen un único PRP y la Ecuación (2.2) para barridos conformados por grupos de pulsos emitidos con 2 PRP distintos y procesados con técnicas de procesamiento tipo Staggered o Dual-PRF.

- **Rango Máximo No Ambiguo:** mientras mayor es la PRF (menor PRP) menor es el rango máximo no ambiguo que se obtiene. Las siguientes ecuaciones permiten realizar el cálculo de

este parámetro en función de la PRP definida y el valor de la velocidad de la luz (c):

$$R_a = \frac{c \text{ PRP}}{2} \quad (2.3)$$

$$R_a = \frac{c \text{ PRP}_{min}}{2} \quad (2.4)$$

donde la Ecuación (2.3) se utiliza para barridos donde todos los grupos de pulsos tienen un único PRP y la Ecuación (2.4) para barridos con dos grupos de pulsos emitidos con PRP distintas.

- **Ancho del Pulso:** el PRP puede condicionar el ancho de pulso factible de ser utilizado en función del ciclo de trabajo máximo soportado por el transmisor. Por ejemplo, un transmisor con un ciclo de trabajo de 0,1 % obliga a que el ancho del pulso sea 1000 veces menor que el PRP utilizado.

Ancho de Pulso

La duración o Ancho del Pulso (PW, por sus siglas en Inglés "Pulse Width") regula los siguientes aspectos:

- **Sensibilidad:** un ancho de pulso más largo implica más energía emitida durante la transmisión. Esto mejora consecuentemente la Relación Señal a Ruido (SNR, por sus siglas en Inglés "Signal to Noise Ratio") y por lo tanto la sensibilidad del sistema.
- **Resolución en Rango:** la resolución en rango del radar depende del ancho del pulso, mientras menor es este mejor es la resolución. Esta puede calcularse a través de la siguiente Ecuación: $\Delta R = \frac{c\tau}{2}$, donde τ es el ancho del pulso de radar y c la velocidad de la luz. El tamaño final de la celda puede sufrir algunas variaciones debido a fenómenos de ensanchamiento de los pulsos, como es el caso del efecto producido por el ancho de banda limitado de las cadenas de transmisión y recepción.
- **Período de Repetición entre Pulsos:** el ancho del pulso puede condicionar el PRP factible de ser utilizado en función del ciclo de trabajo máximo soportado por el transmisor. Por ejemplo, un transmisor con un ciclo de trabajo de 0,1 % obliga a que la PRP tenga una duración 1000 veces mayor que el ancho del pulso transmitido.

Alcance Máximo

El alcance máximo es configurado generalmente para todos los grupos de pulsos de un barrido y suele alcanzar valores de hasta 500 km. La modificación de este parámetro trae aparejado las siguientes consecuencias:

- **PRP:** este parámetro debe ser mayor que el tiempo que demora un pulso ida y vuelta hasta el rango coincidente con el alcance máximo elegido.
- **SNR:** la potencia de las ondas electromagnéticas va disminuyendo a medida que se aleja del radar. Si se mantiene el ancho del pulso fijo y se aumenta el rango máximo la SNR disminuirá consecuentemente.

Alcance Mínimo

El alcance mínimo, es decir la distancia a partir de la cual se pueden empezar a registrar o considerar válidas las mediciones, se define a partir del máximo valor entre el desplazamiento alcanzado por la onda electromagnética en el tiempo requerido para la conmutación entre el modo de transmisión y recepción del radar o la distancia necesaria para que se conforme el campo lejano del patrón de radiación de la antena.

2.3 Ecuación de Radar Meteorológico

2.3.1 Ecuación de Radar: Blanco Puntual

La Ecuación (2.5) es la expresión más comunmente utilizada para representar el principio de funcionamiento de un radar monoestático en su interacción con un blanco puntual:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \frac{\sigma}{4\pi r^2} A_e \quad (2.5)$$

Donde:

- P_t = potencia de salida del transmisor (watts)
- G_t = ganancia de la antena de transmisión del radar (sin dimensión)
- r = distancia desde el radar al blanco (metros)
- σ = Sección Transversal de Radar (RCS, por sus siglas en Inglés "Radar Cross-section") (m^2)
- A_e = área efectiva de la antena receptora del radar (m^2)
- P_r = potencia recibida en el radar luego de la interacción del blanco con la onda emitida (watts).

El área efectiva de la antena puede escribirse como:

$$A_e = \frac{G_t \lambda^2}{4\pi} \quad (2.6)$$

Reemplazando (2.6) en (2.5) y operando nos queda:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \frac{\sigma}{4\pi r^2} \frac{G_t \lambda^2}{4\pi} \quad (2.7)$$

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \quad (2.8)$$

$$P_r = \left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \right] \frac{\sigma}{r^4} \quad (2.9)$$

$$(2.10)$$

Una vez establecida la configuración inicial del radar y calibrados sus subsistemas, la expresión $\left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \right]$ se transforma en una constante. Luego, si llamamos β a esta constante y la reemplazamos en la Ecuación (2.9) obtenemos una forma compacta de la ecuación de radar:

$$P_r = \beta \frac{\sigma}{r^4} \quad (2.11)$$

2.3.2 Ecuación de Radar: Blanco Distribuido

En el apartado anterior se presentó la ecuación de radar para un blanco puntual. En esta sección se partirá de dicha expresión y se desarrollará la misma para el caso de blancos distribuidos.

Utilizando la teoría de Mie podemos reescribir la expresión de la sección transversal de radar σ del blanco puntual a una que permita describir las características de retrodispersión de las partículas distribuidas en un volumen de resolución determinado:

$$\sigma = \eta V \quad (2.12)$$

Donde V es el volumen de la celda de resolución del radar y η la sumatoria de las superficies de retrodispersión de las i -ésimas partículas (σ_i) distribuidas en este:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (2.13)$$

Utilizando la aproximación de Rayleigh podemos escribir σ_i como:

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |k_w^2| D_i^6 \quad (2.14)$$

Donde λ es la longitud de onda del radar, D_i^6 el diámetro de la partícula i-ésima y $|k_w^2|$ es una constante que depende de las propiedades dieléctricas de las partículas y puede expresarse como:

$$|k_w^2| = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (2.15)$$

Donde m es el índice complejo de refracción. $K_w^2 \approx 0,93$ es un valor típico para el agua entre 0 y 20°C y longitudes de onda en el orden de cm.

Luego, reemplazando las ecuaciones (2.14) en (2.13), podemos escribir a η como:

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |k_w^2| \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (2.16)$$

El volumen del blanco distribuido V puede escribirse como:

$$V = \frac{\pi\theta\phi r^2 c\tau}{8} \quad (2.17)$$

Donde θ y ϕ son los ángulos de apertura del lóbulo principal del elemento reflectante, c la velocidad de la luz, τ es el período de muestreo del receptor analógico y r la distancia desde la celda analizada hasta el radar.

Retomando la Ecuación (2.11) para blanco puntual y reemplazando σ por la Ecuación (2.12) obtenemos:

$$P_r = \beta \frac{\eta V}{r^4} \quad (2.18)$$

Luego reemplazando las ecuaciones (2.16) y (2.17) en (2.18) y operando, nos queda:

$$P_r = \beta \left[\frac{\pi^5}{\lambda^4} |k_w^2| \sum_{i=1}^N D_i^6 \right] \left[\frac{\pi\theta\phi r^2 c\tau}{8} \right] \frac{1}{r^4} \quad (2.19)$$

$$P_r = \beta \left[\frac{\pi^6\theta\phi c\tau |k_w^2|}{8\lambda^4 r^2} \right] \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (2.20)$$

El último término $\sum_{i=1}^N D_i^6$ suele denominarse ‘Factor de Reflectividad Equivalente’, se denota con la letra Z y sus unidades en MKS son $\frac{m^6}{m^3}$. Se analizará en detalle esta variable en la sección 2.4.

$$Z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (2.21)$$

Ahora, si utilizamos la nomenclatura de la Ecuación (2.21) en la Ecuación (2.20), esta última nos quedaría:

$$P_r = \beta \left[\frac{\pi^6\theta\phi c\tau |k_w^2|}{8\lambda^4 r^2} \right] Z \quad (2.22)$$

y teniendo en cuenta que $\beta = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2}{(4\pi)^3}$ nos queda:

$$P_r = \left[\frac{P_t G_t^2 \lambda^2}{(4\pi)^3} \right] \left[\frac{\pi^6 \theta \phi c \tau |k_w^2|}{8 \lambda^4 r^2} \right] Z \quad (2.23)$$

$$P_r = \left[\frac{P_t G_t^2 \pi^3 \theta \phi c \tau |k_w^2|}{512 \lambda^2 r^2} \right] Z \quad (2.24)$$

Si consideramos que el patrón de radiación de la antena no es uniforme y suponiendo el mismo con una forma Gaussiana, la expresión anterior se transforma en:

$$P_r = \left[\frac{P_t G_t^2 \pi^3 \theta \phi c \tau |k_w^2|}{512 \lambda^2 r^2 (2 \ln 2)} \right] Z \quad (2.25)$$

Luego, teniendo en cuenta las pérdidas de potencia en la transmisión y recepción, el error de sincronismo entre el muestreo en el receptor y el rango real de los objetivos, la función de transferencia del receptor y las atenuaciones en el medio de transmisión, la Ecuación (2.25) nos queda:

$$P_r = \left[\frac{P_t G_t^2 \pi^3 \theta^2 c \tau |k_w^2| L^2 l_r}{2^{10} (2 \ln 2) \lambda^2 r^2} \right] Z \quad \text{o equivalentemente :} \quad (2.26)$$

$$P_r = \frac{\beta' Z}{r^2} \quad (2.27)$$

Si el haz es simétrico en ambas coordenadas $\theta \phi$ es equivalente a θ^2 . $L^2 = L_R L_T L_\alpha^2$ donde L_R y L_T son las pérdidas en recepción y transmisión respectivamente, L_α^2 es la atenuación que sufre la señal en los caminos de ida y vuelta hacia y desde el objetivo al radar. l_r representa los errores introducidos por la función de transferencia del receptor y los errores de sincronismo productos del desfase entre el muestreo de la señal y la posición real de los blancos.

En un modo de operación normal los radares miden la potencia recibida en cada uno de los volúmenes de resolución que componen un pulso. Si se conoce la potencia de transmisión y la constante de radar es factible determinar Z para un cierto volumen de resolución. Luego, despejando Z de la Ecuación (2.26), nos queda:

$$Z = \left[\frac{P_r}{P_t} \right] \left[\frac{2^{10} (2 \ln 2) \lambda^2 r^2}{G_t^2 \pi^3 \theta^2 c \tau |k_w^2| L^2 l_r} \right] \left[10^{18} \right] \quad (2.28)$$

El último término $[10^{18}]$ es un factor de escala incorporado para poder expresar Z en $mm^6 m^{-3}$, unidades utilizadas de forma convencional para representar la variable.

2.4 Factor de Reflectividad Horizontal y Vertical

El Factor de Reflectividad Equivalente, como se vio en el apartado anterior, se define como la suma de la sexta potencia de los diámetros de la totalidad de los hidrometeoros presentes dentro de un volumen de resolución, esto es:

$$Z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (2.21)$$

En la sección 2.3.2 se vio como operando a partir de la Ecuación (2.21) se obtiene la Ecuación (2.28), que describe el Factor de Reflectividad Equivalente en función de los parámetros de radar y la potencia recibida normalizada. Si Z es calculado utilizando el canal de transmisión horizontal del

radar se denomina Z_h , mientras que si es usado el canal vertical la variable es denominada Factor de Reflectividad Equivalente Vertical (Z_v).

Dado que el tamaño de las gotas de lluvia suele medirse en milímetros y el volumen normalmente se expresa en metros cúbicos, el factor de reflectividad del radar se expresa en $mm^6 m^{-3}$. Los valores típicos de reflectividad para llovizna o nubes que no producen precipitación oscilan entre 10^{-5} y 10 y, por otro lado, en el caso de lluvias muy intensas y granizo, Z puede alcanzar valores del orden de 10^7 . Como este rango de valores comprende varios órdenes de magnitud resulta difícil su representación gráfica utilizando escalas lineales. Es por ello que normalmente los productos de radar se representan utilizando escalas logarítmicas, en este caso se utilizan decibelios de Z (dBZ) y la escala suele abarcar de -30 a 75 dBZ. La Ecuación 2.29 representa la forma logarítmica de Z . La tabla 2.1 resume los valores típicos de Z en decibelios para distintos fenómenos atmosféricos.

$$dBZ = 10 \log_{10} Z \quad (2.29)$$

Reflectividad [dBZ]	Categoría
18 a 30	Lluvia Leve
30 a 41	Lluvia Moderada
41 a 46	Lluvia Intensa
46 a 50	Lluvia Muy Intensa
50 a 57	Lluvia Extrema
> 57	Lluvia Extrema con Granizo
> 70	Granizo Muy Grande
25	Nieve

Tabla 2.1: Valores típicos de reflectividad para distintos fenómenos atmosféricos.

La dependencia de la sexta potencia significa que las partículas grandes predominan en el valor de reflectividad calculado. La Figura 2.10 es una simulación de dos volúmenes de resolución con idéntico valor de Z pero muy distinta Distribución de Tamaño de Gotas (DSD, por sus siglas en Inglés "Drop Size Distribution"). Mientras el cubo izquierdo cuenta con unas pocas gotas grandes y algo de pedrisco pequeño, el volumen representado en el cubo derecho está compuesto por cientos de gotitas de lluvia, sin embargo el valor de Z simulado es idéntico para ambos casos.

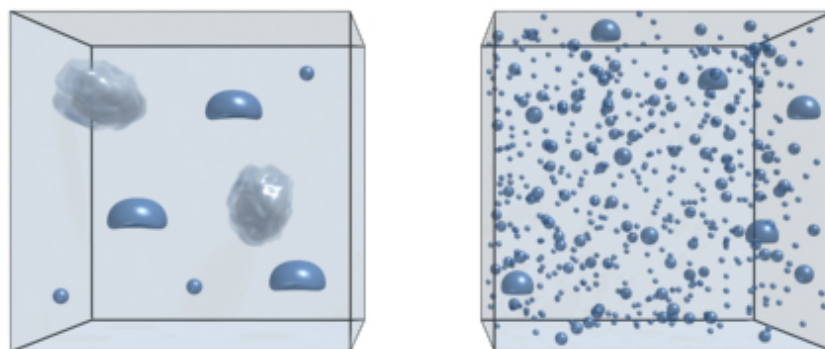


Figura 2.10: Simulación de dos volúmenes de resolución con idéntico Z y distinta DSD. Gráfica extraída de COMET Program.

La Figura 2.11 muestra un PPI de Z_h generado por el RMA-1 el día 9/2/2018. A la derecha del rectángulo central se ubica la escala de colores utilizada para representar los valores de Z_h . Analizando

la figura se pueden distinguir fácilmente los bordes y núcleos de las distintas tormentas que se estaban desarrollando en dicho momento sobre la Provincia de Córdoba. Al noreste del radar se observa un núcleo importante con valores cercanos a los 60 dBZ, al este una tormenta de menor intensidad con reflectividades en el orden de los 15 a 30 dBZ y al suroeste se ve un amplio frente de tormenta con varios núcleos severos.

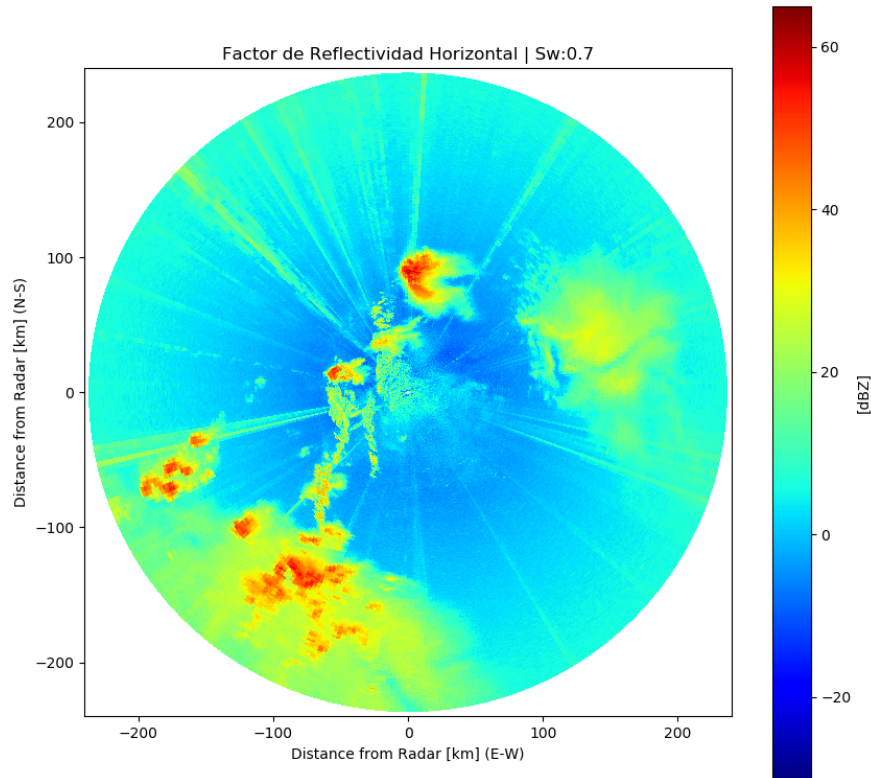


Figura 2.11: PPI del Factor de Reflectividad Equivalente registrado por el RMA1 el día 9/2/2018 a las 2:15 h (UTC).

2.5 Variables Polarimétricas

2.5.1 Factor de Reflectividad Diferencial

El Factor de Reflectividad Diferencial (Z_{dr}) es la relación entre el Z_h y el Z_v y se define como:

$$Z_{dr} = 10 \log \left(\frac{P_h}{P_v} \right) \quad (2.30)$$

Donde P_h y P_v son la potencia recibida en el canal horizontal y vertical respectivamente.

Luego, teniendo en cuenta la definiciones de Z_h y Z_v y operando podemos expresar Z_{dr} como:

$$Z_{dr} = 10 \log P_h - 10 \log P_v \quad (2.31)$$

$$Z_{dr} = Z_h - Z_v \quad (2.32)$$

En general Z_{dr} es un buen indicador de la forma media del hidrometeoro dominante en una celda de radar. Se mide generalmente en dB y sus valores típicos van de -7,9 a 7,9 dB. Valores positivos de Z_{dr} indican que las partículas dominantes son más alargadas en el eje horizontal que en el vertical y

vice versa. Valores cercanos a cero indican que las dimensiones de los blancos son similares, tanto horizontal como verticalmente. La Figura 2.12 resume el comportamiento de Z_{dr} en función de la forma media del hidrometeoro dominante dentro del volumen de resolución. Otra particularidad de su comportamiento, es que Z_{dr} tiene tendencia a favorecer a los hidrometeoros grandes, es decir, su valor tiende a representar las partículas más grandes del volumen de resolución.

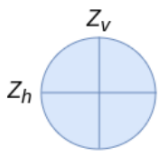
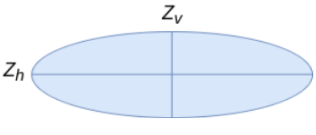
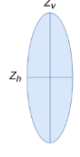
Esféricos	Orientados Horizontalmente	Orientados Verticalmente
Ej. llovizna, granizo pequeño, etc.	Ej. lluvia, hielo en derretimiento, etc	Ej. cristales de hielo verticalmente orientados.
		
$Z_h \sim Z_v$	$Z_h > Z_v$	$Z_h < Z_v$
$ZDR \sim 0$	$ZDR > 0$	$ZDR < 0$

Figura 2.12: Comportamiento de Z_{dr} respecto a la forma media del hidrometeoro dominante dentro del volumen de resolución.

Cuando se miden gotas de agua existe una relación directa entre el valor de Z_{dr} y su tamaño. Las gotas grandes precipitan en forma oblada y el valor de Z_{dr} es mayor a 0. Las gotas pequeñas son generalmente más esféricas y el valor de Z_{dr} es cercano a 0. Las mediciones de granizo arrojan valores de Z_{dr} cercanos a 0 ya que, en promedio, el granizo presenta una forma esférica producto de las altas velocidades de rotación que adquiere durante su caída. Si el granizo no está recubierto de una capa de agua derretida su valor de reflectividad será relativamente baja en comparación a una gota del mismo tamaño. La Figura 2.13 resume los valores típicos de Z_{dr} discriminados por tipo de hidrometeoro.

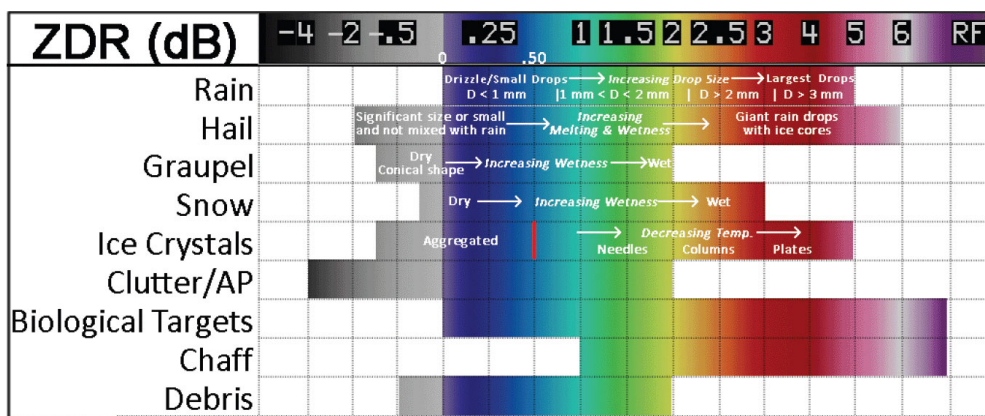


Figura 2.13: Valores típicos de Z_{dr} discriminados por tipo de hidrometeoro. Gráfica extraída de National Weather Service, 2019a.

La Figura 2.14 es un PPI de Z_{dr} generado por el RMA1. El barrido utilizado coincide con el representado en la Figura 2.11 para Z_h . En esta se aprecian los mismos sectores detectados para Z_h . En los tres sectores se observan valores de Z_{dr} cercanos a 4, indicando posible presencia de nubes

precipitantes en los mismos. Notar como en el núcleo noreste algunas celdas alcanzan valores de Z_{dr} superiores a 6.

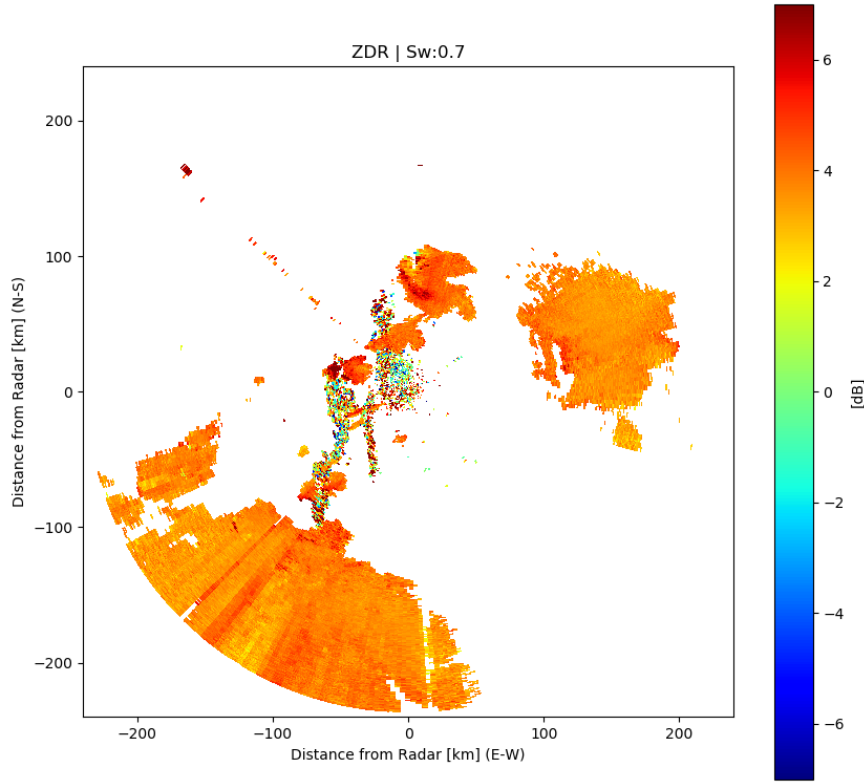


Figura 2.14: PPI de la Reflectividad Diferencial registrado por el RMA1 el día 9/2/2018 a las 2:15 h (UTC).

2.5.2 Coeficiente de Correlación Co-Polar

Coeficiente de Correlación Co-Polar (ρ_{hv}) está definido por la siguiente ecuación:

$$|\rho_{co}| = \frac{|R_{co}^*|}{\sqrt{P_{co}^h P_{co}^v}} = \frac{|S_{vv}| |S_{hh}|}{\sqrt{|S_{hh}|^2 |S_{vv}|^2}} \quad (2.33)$$

donde: P_{co}^h y P_{co}^v son las potencia co-polar recibida en el canal H y V, respectivamente; y R_{co} es el término de correlación.

ρ_{hv} puede ser usado para distinguir hidrometeoros, ecos no meteorológicos, mezcla de hidrometeoros líquidos y sólidos, identificar granizo, escombros de tornados, cenizas de incendios, entre otros.

El ρ_{hv} es una medida de cuan similarmente se comportan los pulsos polarizados horizontal y verticalmente dentro de un volumen de resolución. Es decir, la variable permite medir de la consistencia de las formas y tamaños de blancos dentro del volumen analizado. Valores más altos indican mayor consistencia en la forma y tamaño de las partículas mientras que valores bajos indican gran variabilidad de las mismas.

La Figura 2.15 muestra un ejemplo del comportamiento de la variable. Si pulso a pulso la magnitud, el ángulo de fase o ambos cambian de forma diferente para los pulsos horizontales y verticales se obtiene un ρ_{hv} bajo, por el contrario si los cambios son similares el valor de ρ_{hv} resultante es alto.

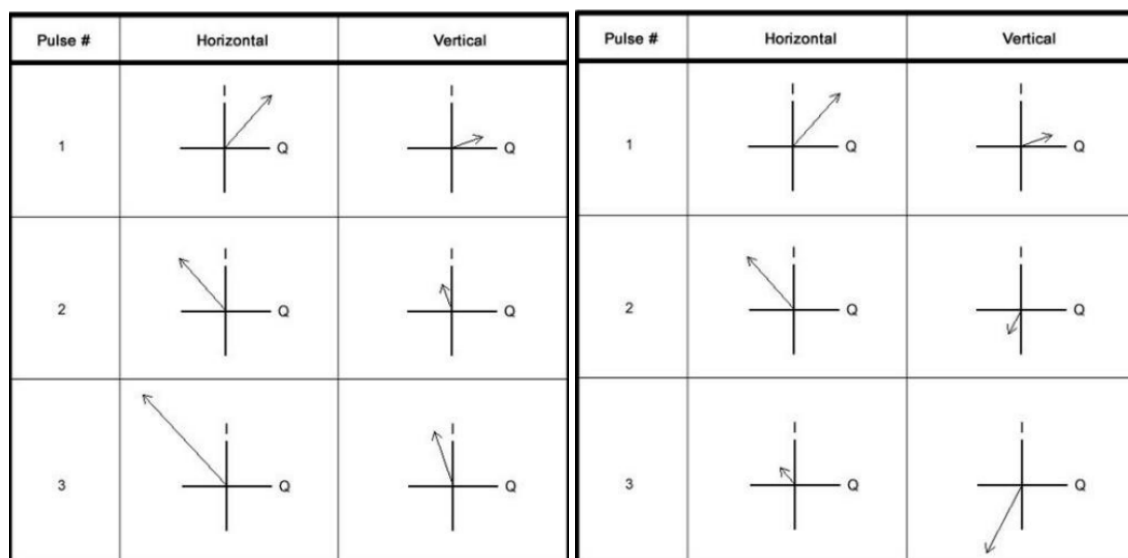


Figura 2.15: (Izq) De pulso a pulso, los pulsos H y V cambian de manera similar. Si el ángulo de fase cambia para H, el canal V sufre un cambio de la misma naturaleza (Pulso 1 a 2). Si la potencia cambia en H, el canal V cambia de manera similar (Pulso 1 a 2). Los cambios similares en las características entre los pulsos H y V de pulso a pulso resultan en un ρ_{hv} alto. (Der) De pulso a pulso, los pulsos H y V cambian de manera completamente diferente. La potencia permanece similar del pulso 1 a 2, pero el cambio en el ángulo de fase del canal H es diferente que el cambio en el ángulo de fase del canal V. Del pulso 2 a 3, la potencia se incrementa en el canal V pero decrece en el canal H. Este tipo de comportamiento entre los pulsos H y V de pulso a pulso resultan en un bajo ρ_{hv} . Gráfica extraída de «fuente».

Los valores típicos de ρ_{hv} se encuentran comprendidos entre 0,2 y 1,05. La variable es adimensional. Los blancos no-meteorológico como pájaros, insectos, murciélagos, entre otros, tienen una retrodispersión compleja. En estos los pulsos horizontales y verticales cambian de forma variada pulso a pulso, lo que resulta en bajos valores de ρ_{hv} , típicamente menores a 0,8. Los blancos meteorológicos no uniformes como granizo, nieve en derretimiento, entre otros, tienen una retrodispersión de complejidad media. Las diferencias pulso a pulso entre los canales horizontales y verticales son moderadas, arrojando valores de ρ_{hv} comprendidos entre los 0,80 a 0,97. Finalmente, los blancos meteorológico uniformes como gotas de lluvia, nieve, entre otros, tienen una retrodispersión de buen comportamiento pulso a pulso. Las diferencias registradas en los canales horizontales y verticales entre pulsos son pequeñas, resultando así en valores de ρ_{hv} mayores a 0,97. La Figura 2.16 resume los valores típicos de ρ_{hv} en función del tipo de hidrometeoro.

La Figura 2.17 es un PPI de ρ_{hv} registrado por el RMA1. Se ha utilizado el mismo barrido que se ilustró en en las Figuras 2.11 y 2.14 para representar los productos de Z y Z_{dr} , respectivamente. En este caso, el producto ρ_{hv} permite identificar fácilmente los sectores que contienen blancos meteorológicos de aquellos que tienen ecos no-meteorológicos, clutter, ruido y, en muchos casos, interferencias de radio enlaces externos. A su vez el alto valor de ρ_{hv} (muy cercano a 1) registrado en los sectores de blancos meteorológicos indican la presencia de nubes homogéneas sin la presencia de granizo, reafirmando lo presumido en el análisis de la Figura 2.14.

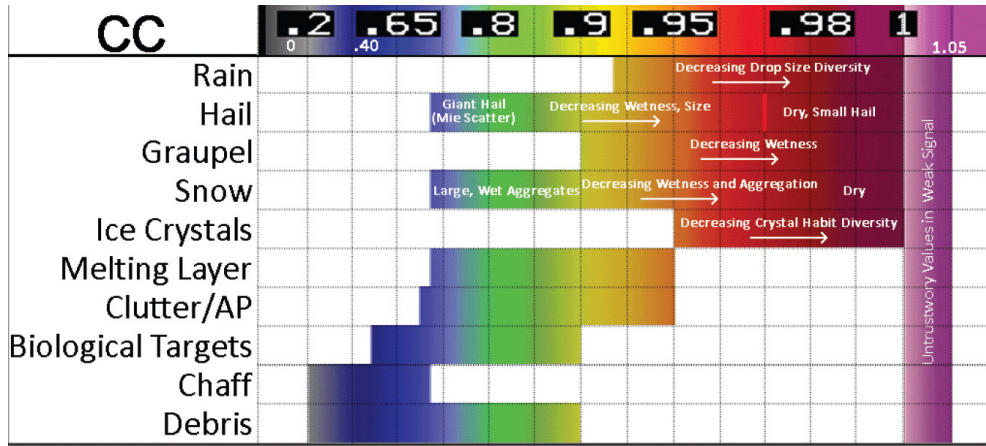


Figura 2.16: Valores típicos de ρ_{hv} discriminados por tipo de hidrometeorio. Gráfica extraída de National Weather Service, 2019a.

2.5.3 Fase Diferencial y Fase Diferencial Específica

Fase Diferencial (ϕ_{dp})

La ϕ_{dp} es la diferencia del corrimiento de fase que sufren los pulsos horizontales y verticales en el recorrido completo del haz de radar. Cuando las ondas electromagnéticas, correspondientes a ambas polarizaciones, atraviesan un conjunto de blancos comienzan a atenuarse y ralentizarse, produciendo así un cambio de fase con distintas magnitudes en ambas señales. Por lo tanto, ϕ_{dp} es un buen indicador de la forma y concentración de los hidrometeoros. La definición formal de la variable es expresada a continuación:

$$\rho_{co} = \frac{|S_{vv}| |S_{vv}| e^{-j(\rho_{co} + \phi_{dp})}}{\sqrt{|S_{hh}|^2 |S_{vv}|^2}} \quad (2.34)$$

$$\arg(\rho_{hv}) = \Psi_{dp} + \rho_{co} + \Phi_{dp} \quad (2.35)$$

donde Ψ_{dp} es la Fase Diferencial, Φ_{dp} es la fase diferencial de propagación y ρ_{co} es la fase diferencial de retrodispersión (efecto de Mie), todas con unidad de medida el grado. Para el régimen de Rayleigh, ρ_{co} es pequeño y la fase diferencial medida es esencialmente la ϕ_{dp} .

El rango de valores posibles de ϕ_{dp} va desde 0 a 360°. Cuando el desplazamiento acumulado supera los 360° se continúa contando a partir de 0°. Este efecto es posible de corregir con postprocesamiento, en el cual se tiene en cuenta el recorrido total del haz a lo largo del camino de propagación y los valores de ϕ_{dp} pueden abarcar desde 0 a N grados. Esto último producto se denomina comúnmente como ϕ_{dp} corregido.

El comportamiento de ϕ_{dp} depende de las partículas dominantes dentro del volumen de resolución. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen del comportamiento de la variable cuando los hidrometeoros dominantes son gotas de lluvia, granizo, cristales de hielo y nieve o ecos no meteorológicos.

La Figura 2.18 muestra un PPI de la variable ϕ_{dp} . En esta se representa el mismo barrido analizado en las figuras 2.11, 2.14, y 2.17 para las variables Z , Z_{dr} y ρ_{hv} respectivamente. En los sectores asociados previamente a nubes precipitantes se registran valores de ϕ_{dp} generales superiores a 50°. Adicionalmente, los sectores coincidentes con los núcleos convectivos (ver Figura 2.11) alcanzan valores de ϕ_{dp} superiores a 100°, lo que indica desarrollo de precipitaciones muy intensas en dichas regiones.

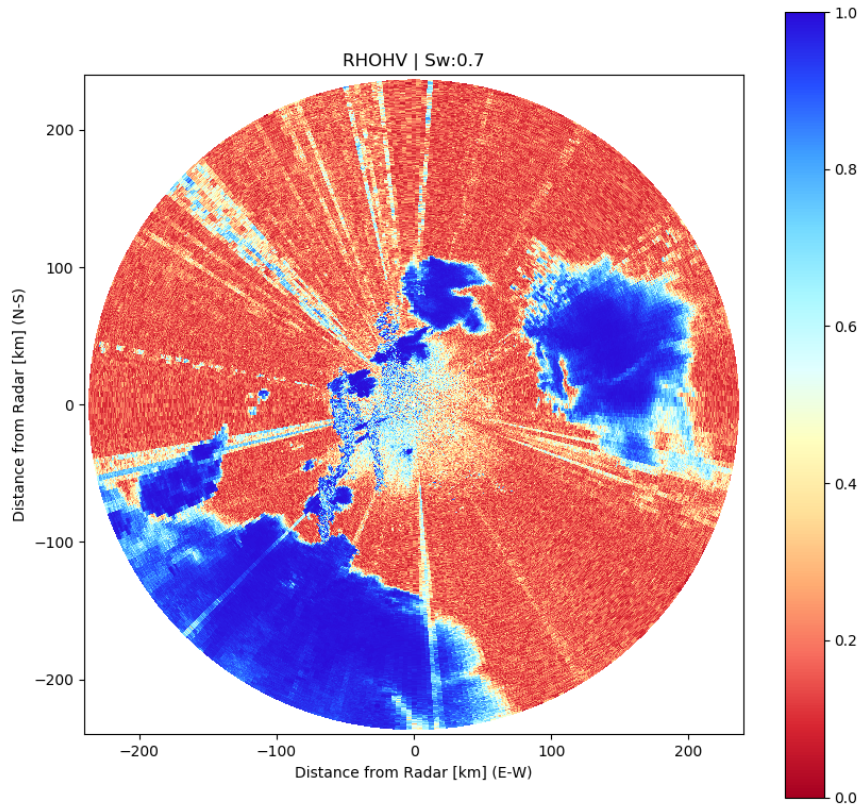


Figura 2.17: PPI de ρ_{hv} registrado por el RMA1 el día 9/2/2018 a las 2:15 h (UTC).

Fase Diferencial Específica (K_{dp})

La desventaja que presenta ϕ_{dp} es que sus valores son acumulativos a lo largo de un radial, lo que dificulta la interpretación de la variable. Es por ello que se define K_{dp} como la derivada en rango de ϕ_{dp} , esto es:

$$K_{dp} = \frac{1}{2} \frac{d\Phi_{dp}}{dr} \quad \text{o equivalentemente:} \quad (2.36)$$

$$K_{dp} = \frac{\Phi_{dp}(r_2) - \Phi_{dp}(r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (2.37)$$

K_{dp} se mide en $[\frac{\circ}{km}]$ y su rango de valores típicos va desde -2 a 10. La Figura 2.19 resume estos valores para distintos hidrometeoros dominantes.

Diferencias entre ϕ_{dp} y K_{dp}

La Figura 2.20 compara el comportamiento de ϕ_{dp} y K_{dp} a lo largo de un radial. En esta se ve como el uso de K_{dp} es más intuitivo para identificar sectores con presencia de agua líquida que ϕ_{dp} .

Ambas variables son buenos indicadores del contenido de agua líquida presente en la atmósfera. Esto se debe a que a mayor cantidad de agua por unidad de volumen, mayor es el desfase entre las dos polarizaciones ortogonales y, por ende, mayor el valor resultante de ambas variables.

2.5.4 Velocidad Doppler y Ancho Espectral

El radar meteorológico aprovecha el efecto Doppler para medir la velocidad de desplazamiento media de los hidrometeoros dentro de un volumen de resolución. Es decir, se aprovecha el desplazamiento en frecuencia que se produce por el movimiento relativo entre la fuente emisora y el blanco.

Hidrometeoros	Descripción
Lluvia	Mientras más grande es el tamaño o mayor es la concentración de las partículas más grande y positivo es ϕ_{dp} .
Granizo	El granizo es visto en promedio por el radar como una superficie esférica debido a la rotación generada en la caída, esto conduce a valores de ϕ_{dp} cercanos a 0. En cambio si hay granizo en derretimiento ϕ_{dp} se comportará como si estuviera midiendo grandes gotas de lluvia. El valor de ϕ_{dp} en lluvia no se ve afectado por la presencia de granizo.
Cristales de Hielo y Nieve	Los cristales de hielo y la nieve no tienen una orientación preferencial por lo que típicamente el valor de ϕ_{dp} es cercano a 0°. Si los cristales de hielo son orientados vertical o horizontalmente por algún campo eléctrico ϕ_{dp} se incrementará o reducirá respectivamente.
Blancos No Meteorológicos	ϕ_{dp} se torna muy ruidoso ante la presencia blancos no meteorológicos producto de la sumatoria de la componente de la fase diferencial de retrodispersión.

Tabla 2.2: Descripción del comportamiento de ϕ_{dp} en función del hidrometeoro dominante.

Para calcular la Velocidad Doppler (V_{rad}) de un volumen determinado se necesita conocer el desfase de la señal recibida respecto a la transmitida. Si se envía un pulso electromagnético \hat{E}_t dado por:

$$\hat{E}_t = a(t) e^{j\omega_r t} \quad (2.38)$$

y la distancia al objeto varía en el tiempo como:

$$R(t) = R_0 - vt \quad (2.39)$$

donde v es la velocidad de las partículas hacia el radar, t el tiempo y R_0 la posición inicial.

Si ahora reemplazando (2.39) en (2.38) y operamos, nos queda:

$$\hat{E}_t = \hat{a}' \left(t - \frac{2R_0}{c} \right) e^{j\frac{4\pi c}{\lambda_T} R_0} e^{j2\pi \left(\frac{2v}{\lambda_T} \right) t} e^{j2\omega_r t} \quad (2.40)$$

donde ω_r y λ_T son la frecuencia angular y longitud de onda, respectivamente.

La frecuencia instantánea es la derivada temporal de la fase:

$$\omega = \omega_r + 2\pi f_D \quad (2.41)$$

con f_D la frecuencia Doppler:

$$f_D = \frac{2v}{\lambda_T} \quad (2.42)$$

Las velocidades positivas son asignadas a las celdas donde el conjunto de hidrometeoros sensados en promedio se desplaza acercándose al radar, mientras que velocidades negativas son asignadas a los conjuntos de partículas cuyo desplazamiento se aleja del radar. La aplicación de esta nomenclatura puede apreciarse en la Figura 2.22.

Es importante observar que el radar sólo indica si los blancos se están acercando o alejando y a qué velocidad. La velocidad y dirección real del viento sólo coincidirán con las registradas por el radar en

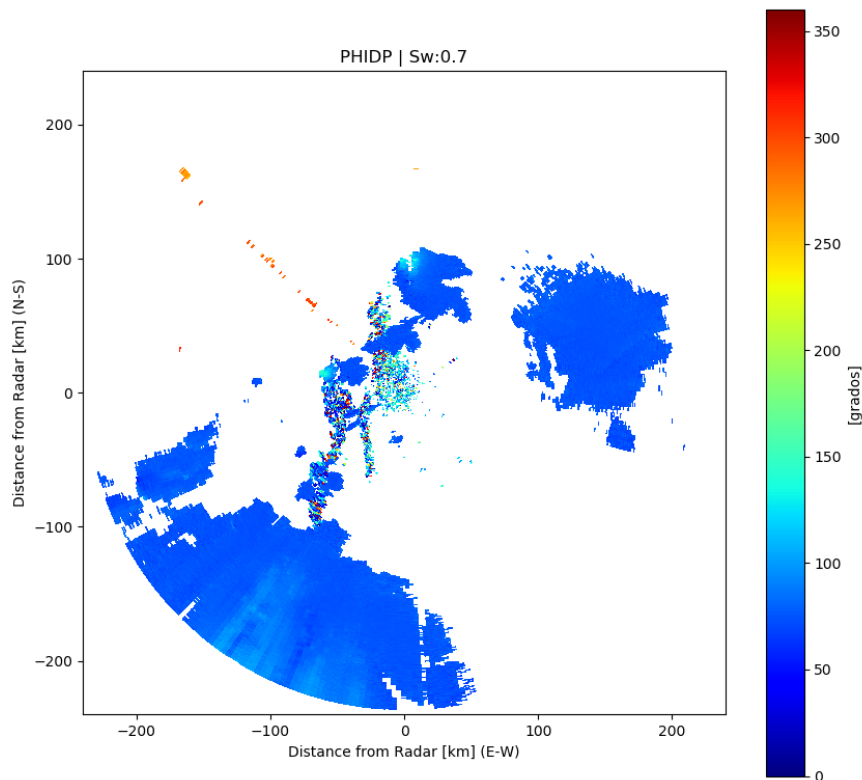


Figura 2.18: PPI de la Fase Diferencial registrado por el RMA1 el día 9/2/2018 a las 2:15 h (UTC).

los lugares donde el haz se alinee perfectamente en sentido paralelo a la dirección de desplazamiento de los blancos. En todos los demás casos solo se mide la componente radial del campo real de viento en dirección al radar. El panel izquierdo de la Figura 2.21 esquematiza la descomposición del vector del campo de viento, donde puede observarse la componente radial que mediría el radar. El panel derecho, por otro lado, muestra un ejemplo donde el viento proviene desde el oeste cuando el radar se encuentra ubicado a 45° en dirección noreste. En este caso la velocidad radial medida por el radar equivaldría al 71 % de la velocidad real del viento.

La Figura 2.22 muestra un PPI de la V_{rad} para la misma tormenta analizada en las figuras 2.11, 2.14, 2.17 y 2.18 para las variables Z , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} respectivamente. El sector precipitante ubicado al noreste del radar tiene una velocidad radial negativa indicando que se está alejando de este. Dentro de este sector, ubicado aproximadamente a los 5° en acimut y 100 km en rango, se ve un efecto repentino de cambio de dirección de la V_{rad} . Es decir, el radar se encuentra midiendo velocidades negativas y de repente se comienzan a observar velocidades positivas. Este efecto se denomina solapamiento o 'aliasing', por la terminología empleada en Inglés, y ocurre cuando la onda electromagnética es desplazada más allá de su posición inicial, por lo que no puede discernirse si la velocidad es saliente o entrante. El campo resultante puede ser corregido o mitigado en postprocesamiento con distintos algoritmos de software.

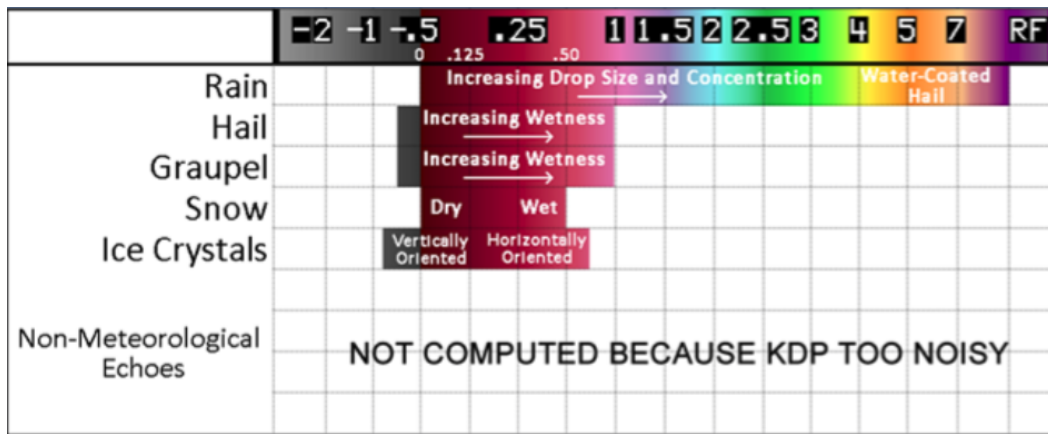


Figura 2.19: Valores típicos de K_{dp} en función del hidrometeoro dominante. Gráfica extraída de National Weather Service, 2019a.

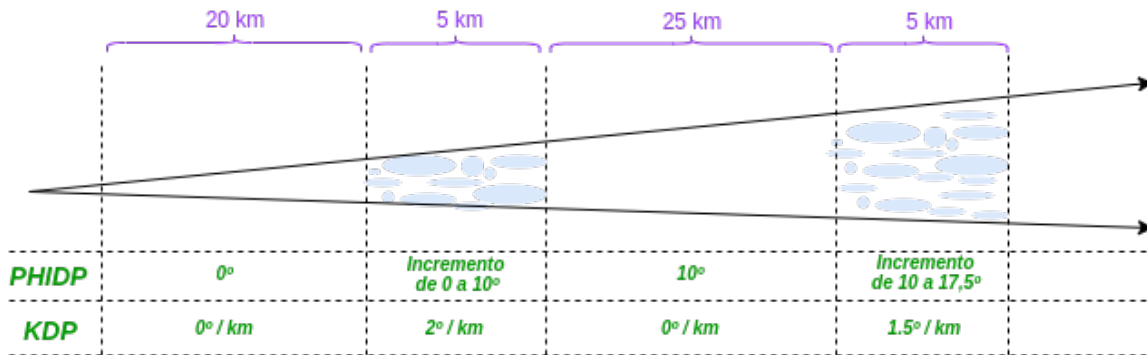


Figura 2.20: Ilustración del comportamiento acumulativo de los valores de ϕ_{dp} en comparación a K_{dp} . Se puede apreciar como K_{dp} determina donde ϕ_{dp} está cambiando.

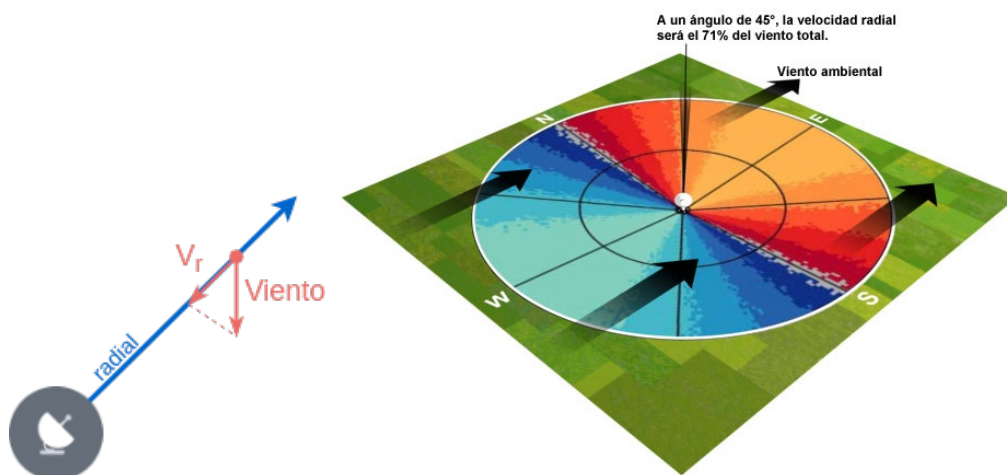


Figura 2.21: (Izq) Esquematación de la componente radial del viento medida por un radar meteorológico. (Der) Ejemplo de un campo de viento desplazándose de oeste a este cuando el radar se encuentra apuntando hacia el noreste (45°). En este caso, el radar medirá aproximadamente el 71 % del valor total del viento.

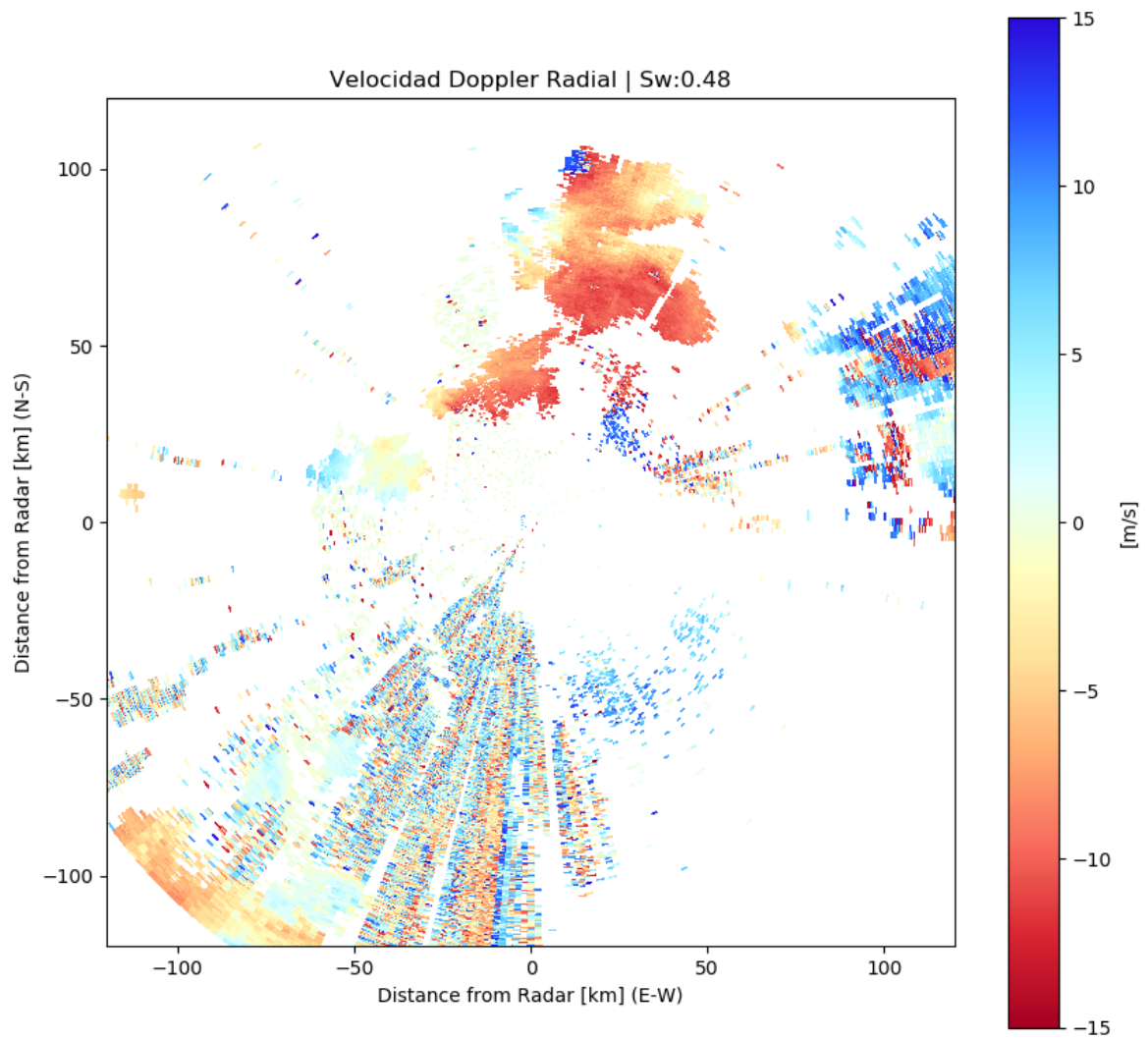


Figura 2.22: PPI de la Velocidad Doppler registrado por el RMA1 el día 9/2/2018 a las 2:15 h (UTC).



3. Biblioteca de Procesamiento de Datos de Nivel 1

En el presente capítulo se describe el desarrollo de una biblioteca de software destinada al procesamiento de datos N1. En este se comienza detallando la estructura interna de los archivos N1, luego se realiza una descripción general y pormenorizada del paquete de software y, por último, se describe la generación, filtrado y almacenamiento de los productos N2.

3.1 Datos de Nivel 1

Como se vio en la introducción del capítulo 2, cada pulso de radar está asociado a la transmisión de una onda electromagnética, que luego de interactuar con los hidrometeoros presentes en la atmósfera, es recibida nuevamente por la antena del radar y redireccionada a través del conjunto de guías de onda hasta el receptor analógico donde es amplificada, filtrada y demodulada a FI. Esta última es finalmente direccionada al receptor digital donde es muestreada, decimada y preprocesada.

Recordando la sección 2.1, denominamos entonces datos N1 o IQ a los datos digitalizados en banda base de las señales en fase y cuadratura de la FI, a los que adicionalmente se les agrega una cabecera que identifica unívocamente el pulso originante. Como se vio en la sección 2.2.2, esta es la unidad mínima de información almacenada por los radares meteorológicos.

Es decir, para cada pulso de radar emitido y canal polarimétrico utilizado, se almacena una cabecera y un vector o conjunto de datos que combinados forman la unidad básica de información que denominamos datos N1. Este *conjunto de datos* contiene la información registrada para cada una de las celdas o volúmenes de resolución cuyo tamaño depende principalmente de la tasa de muestreo utilizada en la etapa de recepción. La *cabecera de los datos N1* contiene la información necesaria para la identificación unívoca de los pulsos. Esta suele contener mínimamente campos que describen las características del pulso originante, el orden del mismo dentro de la estrategia de operación y el momento exacto en que fue emitido. No existen formatos estándares de cabeceras, la estructura y campos de datos incluidos en la misma depende únicamente de la implementación realizada por cada fabricante.

Procesando el vector de datos N1 es posible recuperar tanto la fase como la potencia relativa de las señales originales y, aplicando distintos estimadores estadísticos (ver sección 3.2), se obtienen también los distintos momentos espectrales, variables polarimétricas o productos de Nivel 2 (N2).

3.1.1 Arquitectura de Almacenamiento

Pulsos Los pulsos están compuestos por su cabecera y conjunto de datos, esto es, la información de fase y cuadratura para cada una de las n celdas que componen un pulso.

Archivos IQ Una vez que se ha recopilado la información correspondiente a un conjunto configurable de pulsos, los mismos son empaquetados en archivos binarios o IQ. La organización interna de dichos archivos, cabecera, cantidad de pulsos agrupados e información adicional agregada responde generalmente al diseño propio de cada solución comercial, no encontrándose estándares en dicho rubro. La nomenclatura de los archivos es definida con objeto de poder etiquetar e identificar la información generada por dichos instrumentos, pudiendo distinguir rápidamente el radar generador, estrategia de operación, volumen, fecha y hora de generación.

Barridos Los barridos están conformados por uno o más archivos IQ. Para el resguardo de esta información se utiliza típicamente un almacenamiento de tipo circular, en donde los nuevos barridos generados van reemplazando a los más antiguos. El tiempo de almacenamiento depende del espacio reservado a tal fin en el sistema de archivos, comprendiendo generalmente un período de pocas horas.

La Figura 3.1 ilustra la estructura de datos típica de los pulsos de información, el esquema de almacenamiento de los archivos IQ (grupo de pulsos), la compilación de los distintos barridos de información (grupos de pulsos completando un PPI), y el almacenamiento circular de los mismos.

3.2 Estimadores de Momentos Espectrales y Variables Polarimétricas

3.2.1 Factor de Reflectividad, Velocidad Doppler y Ancho Espectral

Pulse Pair Processing (PPP) es un método de procesamiento doppler ampliamente usado en radares meteorológicos.

En este se asume que el espectro de los datos de tiempo lento, correspondientes a ecos de partículas atmosféricas, están compuestos por ruido y un solo pico doppler localizado fuera del origen de coordenadas, es decir cuya velocidad media es distinta de 0 m/s. Esto es ilustrado en la Figura 3.2. Adicionalmente, se asume que el clutter de terreno en comparación a las celdas con datos meteorológicos es muy bajo, nulo o ha sido removido previamente utilizando algún filtro. Esto puede asumirse teniendo en cuenta que, en general, los radares meteorológicos ubicados en superficie operan con ángulos de elevación positivos respecto al horizonte, por lo que el efecto del clutter de terreno suele ser bajo.

El pico meteorológico $S_w(F)$ es con frecuencia asumido como Gausiano, y es caracterizado por su amplitud, media y desviación estándar. El área total de la componente $S_w(F)$ en el espectro de potencia es igual a la potencia del eco meteorológico. La meta de PPP es estimar la potencia, desplazamiento doppler medio F_0 y el Ancho Espectral (W_{rad}), variancia o σ_F^2 de la componente meteorológica. Cada uno de estos parámetros pueden estimarse utilizando algoritmos basados en dominios temporales o en frecuencia. En este trabajo se optó por la implementación del primer tipo.

La autocorrelación y el espectro de potencia de la secuencia de datos en tiempo lento $y[m]$, $m=0, \dots, M-1$ obtenidos del muestreo de M pulsos a un rango específico son, respectivamente:

$$s_y[k] = \sum_{m=0}^{M-k-1} y[m] y^*[m+k] \quad (3.1)$$

$$S_y(\omega) = F\{s_y[k]\} = |Y(\omega)|^2 \quad (3.2)$$

Estructura de Almacenamiento Datos L1

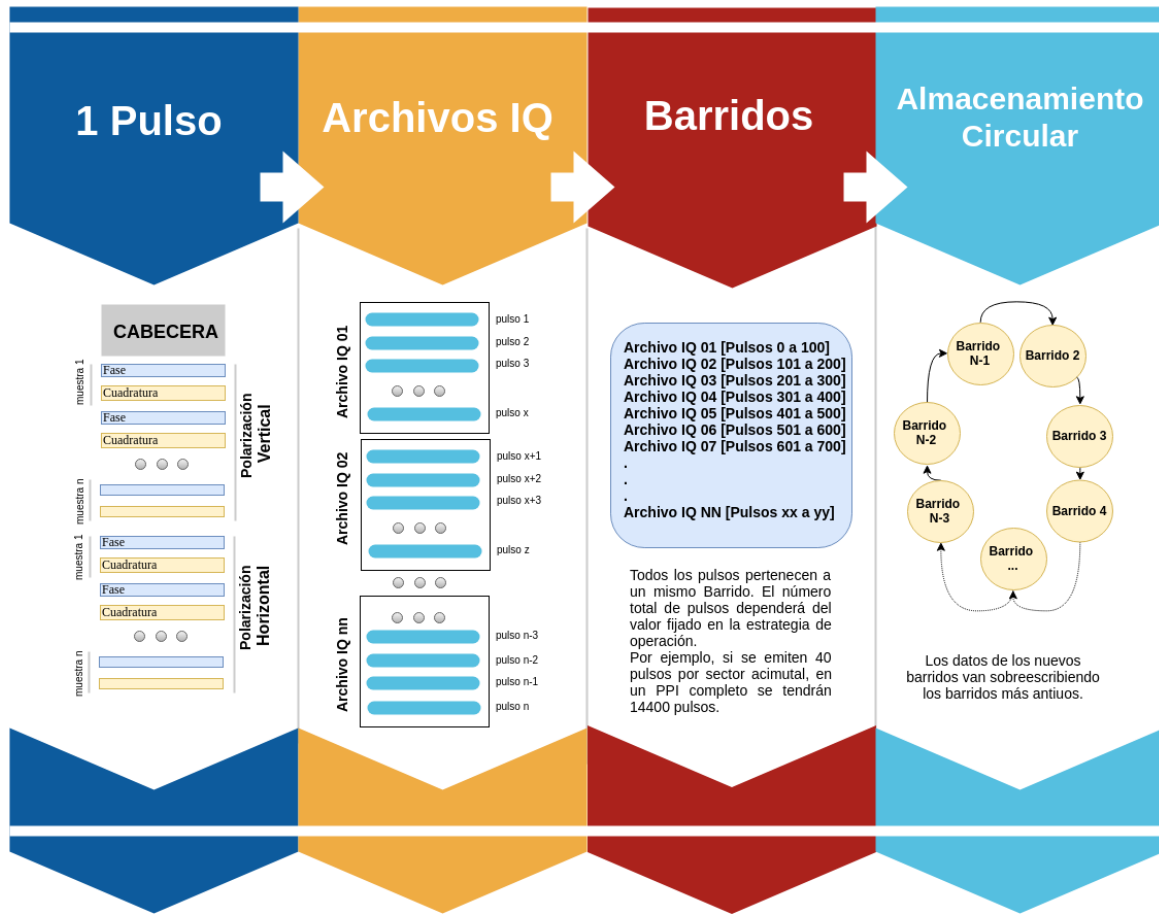


Figura 3.1: Estructura de datos y organización de las distintas etapas de almacenamiento de datos de Nivel 1.

3.2.1.1 Potencia de la Señal y Factor de Reflectividad Horizontal y Vertical

La potencia en la señal de tiempo lento puede ser estimada en el dominio del tiempo a través del pico de la función de autocorrelación [Richards, 2005].

$$P_y = s_y[0] = \sum_{m=0}^{M-1} y[m] y^*[m] = \sum_{m=0}^{M-1} |y[m]|^2 \quad (3.3)$$

Notar que la Ecuación (3.3) es más precisamente la energía de la señal de tiempo lento, si la dividimos por la duración de la señal se obtiene la potencia.

Para el cálculo de Z_h y Z_v se reemplaza el valor de la potencia obtenida para cada uno de los canales en la Ecuación (2.26).

3.2.1.2 Velocidad Doppler Media

En esta instancia asumiremos que la señal es una sinusoidal pura en ausencia de ruido. El espectro de potencia de un elemento finito de señal (señal cuadrada) debería ser una función asinc al cuadrado.

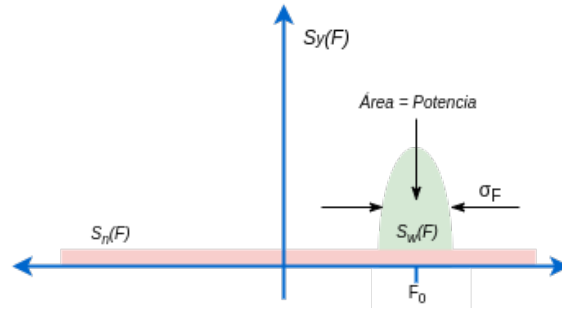


Figura 3.2: El espectro Doppler asumido en PPP consiste en ruido blanco y solo un pico espectral simple.

Si se computa el primer lag de la autocorrelación obtenemos:

$$y[m] = A e^{j2\pi F_0 T m} \quad m = 0, \dots, M-1 \quad (3.4)$$

$$s_y[1] = \sum_{m=0}^{M-2} y[m] y^*[m+1] \quad (3.5)$$

$$s_y[1] = \sum_{m=0}^{M-2} A e^{j2\pi F_0 T m} A^* e^{-j2\pi F_0 T (m+1)} \quad (3.6)$$

$$s_y[1] = |A|^2 \sum_{m=0}^{M-2} e^{-j2\pi F_0 T} \quad (3.7)$$

$$s_y[1] = |A|^2 e^{-j2\pi F_0 T} \sum_{m=0}^{M-2} (1) \quad (3.8)$$

$$s_y[1] = |A|^2 (M-1) e^{-j2\pi F_0 T} \quad (3.9)$$

El argumento de la exponencial $-2\pi F_0 T$ es simplemente el valor de la rotación de fase en un período de muestreo para una sinusoidal de frecuencia F_0 . La frecuencia puede ser determinada de la Ecuación (3.9) como:

$$F_0 = \frac{-1}{2\pi T} \arg\{s_y[1]\} \quad (3.10)$$

Ahora si multiplicamos F_0 por $\lambda/2$ se convierte el resultado a unidades de velocidad.

Aunque el resultado es derivado de una sinusoidal pura, este estimador PPP de tiempo lento funciona relativamente bien para la mayoría de las señales generales debido a que, generalmente, existe un componente en frecuencia dominante simple con una adecuada relación señal a ruido. Notar que el estimador de frecuencia va a sufrir aliasing si la frecuencia Doppler excede la PRF.

3.2.1.3 Ancho Espectral

Para obtener un estimador en el dominio del tiempo de σ_F^2 se asume que el espectro de potencia doppler tiene una forma Gaussiana con desviación estándar σ_F . Se asume, además, que un estimador de F_0 es usado para eliminar la componente de la frecuencia Doppler media, obteniéndose una secuencia modificada $y'[m]$. Es conveniente comenzar con el equivalente de tiempo continuo $y'(t)$. $S_{y'}(F)$ va a ser una función Gaussiana con frecuencia Doppler media de cero.

$$S_{y'}(F) = \frac{|A|^2}{\sqrt{2\pi}\sigma_F} e^{-\frac{F^2}{2\sigma_F^2}} \quad (3.11)$$

Luego, la función de autocorrelación en tiempo continuo es también Gaussiana donde la variable z representa el lag de autocorrelación:

$$s_y(z) = |A|^2 e^{-2 \pi^2 \sigma_F^2 z^2} \quad (3.12)$$

Si el intervalo de muestreo T es escogido suficientemente pequeño para garantizar que $s_y(\frac{1}{2T}) \approx 0$, el espectro en tiempo discreto y la autocorrelación van a ser también Gaussianos. La función de autocorrelación muestreada sería:

$$s_y[k] = s_y(z)|_{z=kT} = |A|^2 e^{-2 \pi^2 \sigma_F^2 k^2 T^2} \quad (3.13)$$

y la correspondiente DTFT, todavía en unidades de Hertz es:

$$S_y(F) = \frac{|A|^2}{\sqrt{2\pi}\sigma_F T} e^{-\frac{F^2}{2\sigma_F^2}} \quad (3.14)$$

Debido a que $s_y[0] = |A|^2$, el primer lag de la función de autocorrelación puede ser escrito como:

$$s_y[1] = |A|^2 e^{-\pi \sigma_F^2 T^2} = s_y[0] e^{-\pi \sigma_F^2 T^2} \quad (3.15)$$

La Ecuación (3.15) es fácilmente resuelta para dar un estimado de la desviación estándar del espectro en términos de solo $s_y[0]$ y $s_y[1]$

$$\sigma_F^2 = -\frac{1}{2 \pi^2 T^2} \ln \left\{ \frac{s_y[1]}{s_y[0]} \right\} \quad (3.16)$$

La Ecuación (3.16) suele ser simplificada para evitar la inclusión en el cómputo numérico del logaritmo natural. Considere la siguiente serie y aproximación de $\ln(x)$:

$$\ln x = \frac{x-1}{x} + \frac{1}{2} \left(\frac{x-1}{x} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{x-1}{x} \right)^3 + \dots \quad (3.17)$$

$$\ln x \approx \frac{x-1}{x} = 1 - \frac{1}{x} \quad (3.18)$$

Finalmente reemplazando la Ecuación (3.18) en la Ecuación (3.16), obtenemos un estimador simplificado del ancho espectral:

$$\sigma_F^2 = -\frac{1}{2 \pi^2 T^2} \left\{ 1 - \frac{s_y[0]}{s_y[1]} \right\} \quad (3.19)$$

3.2.2 Variables Polarimétricas

Las variables Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} son implementadas de forma directa a partir de sus respectivas ecuaciones:

$$Z_{dr} = 10 \log \left(\frac{P_h}{P_v} \right) \quad (2.30)$$

$$|\rho_{hv}| = \frac{|R_{co}^*|}{\sqrt{P_{co}^h P_{co}^v}} \quad (2.33)$$

$$\arg(\phi_{dp}) = \Psi_{dp} + \delta_{co} + \Phi_{dp} \quad (2.35)$$

3.3 Biblioteca de Procesamiento de Datos N1

La sección inicia describiendo la estructura general de la biblioteca, luego se detallan los modos de lectura, modos de reordenamiento de los datos, algoritmos de procesamiento para generar los distintos productos polarimétricos, tipos de procesadores, filtrado de datos y, finalmente, el almacenamiento de la información resultante.

3.3.1 Arquitectura de la Biblioteca

La biblioteca, estructurada en 5 paquetes generales y 12 módulos, ha sido diseñada para decodificar, ordenar y procesar archivos IQ; filtrar y procesar datos de N1; graficar los productos N1 y N2, y almacenar los productos de Nivel 2 resultantes. Desarrollada en el lenguaje de programación 'Python' (testada en versiones 3.6 o superiores) ha sido diseñada e implementada utilizando un modelo de programación orientada a objetos. Adicionalmente, técnicas de procesamiento paralelo han sido aplicadas a los fines de optimizar la performance de módulos críticos, de forma tal de poder aprovechar las arquitecturas de microprocesadores modernos con múltiples núcleos e hilos de procesamiento.

El **paquete 'type_processors'** contiene los módulos relacionados a los tipos de procesamiento soportados en función del modo de emisión de pulsos configurado en el barrido.

Existen principalmente 3 modos de emisión de pulsos:

- *PRF Simple*: se emite un grupo de pulsos por cada sector acimutal a una PRF única.
- *PRF Doble Alternadas*: se emiten dos grupos de pulsos por cada sector acimutal ambos con una PRF distinta. Se emiten primero todos los pulsos del primer grupo y luego los del segundo. Para procesar estos barridos se utilizan técnicas tipo Dual-PRF.
- *PRF Doble Intercaladas*: se emiten dos grupos de pulsos por cada sector acimutal ambos con una PRF distinta. Los pulsos de ambos grupos se emiten de forma intercalada. Para procesar estos barridos se utilizan técnicas tipo Staggered.

El **paquete 'data_processor'** reúne los módulos encargados de procesar los grupos de pulsos por acimut (tiempo lento). Las funciones de los mismos han sido paralelizadas y son analizadas en el apartado de paralelismo. En función de las opciones de procesamiento elegidas por el usuario, el módulo puede calcular un conjunto amplio de productos polarimétricos (ver apartado 3.3.4).

Los módulos del **paquete 'io_iq'** contienen las especificaciones de los formatos de archivos binarios de cada fabricante. Estos realizan la lectura de las cabeceras y datos de los pulsos, archivos IQ individuales y conjunto de ficheros que conforman un barrido. Al finalizar entregan la matriz de datos N1 que contiene la información de tiempo rápido y tiempo lento de todos los pulsos del barrido analizado.

La versión actual del software soporta únicamente archivos binarios de los RMA¹, aunque el diseño modular implementado permitirá incorporar fácilmente archivos IQ de otros radares.

El **paquete 'io'** contiene los módulos utilizados para codificar y almacenar los datos N2 en el formato NetCDF, un estándar abierto para el intercambio de información científica.

Finalmente, los módulos que implementan las herramientas y funciones de visualización gráfica se nuclean en el paquete **'graph'**.

Un diagrama de clases de la biblioteca y los principales módulos de los distintos paquetes generales se pueden ver en la Figura 3.3.

¹El detalle técnico de los archivos IQ de los RMA no forma parte del presente trabajo debido a cláusulas de confidencialidad que deben ser respetadas.

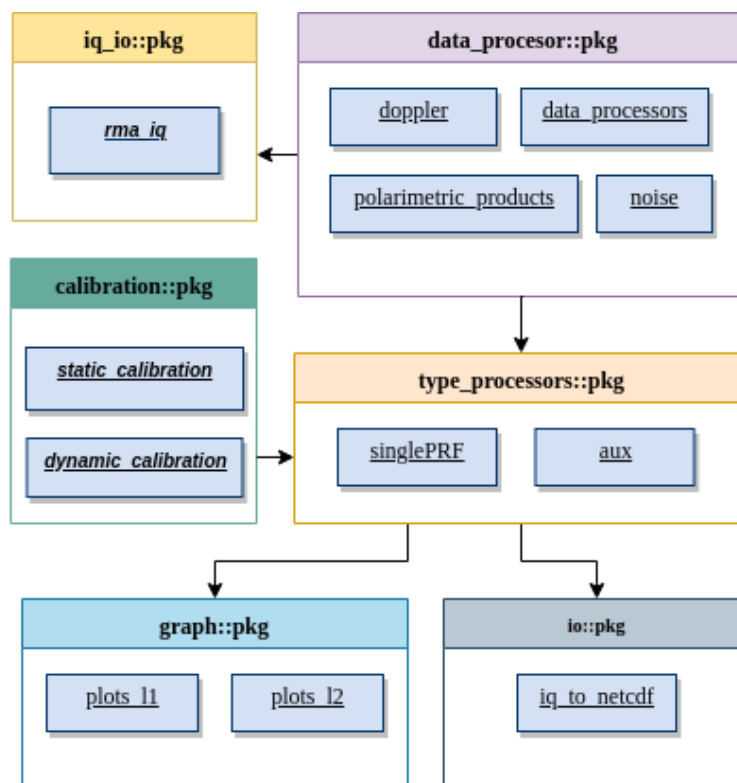


Figura 3.3: Diagrama de clases y módulos de la Biblioteca de Procesamiento de Datos N1.

3.3.2 Lector de Archivos IQ

El módulo de lectura soporta barridos generados con estrategias de emisión de pulsos de PRF única, dos PRF alternadas (Dual-PRF) o dos PRF intercaladas (Staggered).

El procedimiento de lectura y carga de datos N1 es similar en todos los casos. Se comienza leyendo los N archivos IQ que conforman el barrido, luego se leen las cabeceras y datos de cada uno de los pulsos individuales para finalmente, en función del modo de agrupamiento configurado, ordenarlos en una matriz de 3 dimensiones. Estas dimensiones son el número de Acimuts, Celdas y Pulsos.

En el caso de barridos con dos grupos de pulsos por sector acimutal, el lector devuelve 2 matrices de datos N1, cada una con sus respectivas dimensiones. Estas dependen del número de pulsos por grupo y del rango máximo configurado para dicho barrido.

3.3.3 Agrupamiento de Pulsos

3.3.3.1 Agrupamiento Secuencial de Pulsos

La información contenida en la cabecera de datos N1 permite identificar a qué sector acimutal y grupo de pulsos está vinculado un pulso determinado y, además, posibilita identificar el inicio y final de cada barrido y/o grupo de pulsos. Por lo tanto, haciendo uso de esta información, es posible estructurar la matriz de datos respetando el orden del conjunto de pulsos originalmente emitidos para cada sector acimutal.

La Figura 3.4 muestra los resultados obtenidos al procesar un conjunto de archivos binarios generados por el RMA-1 utilizando el modo de ordenamiento convencional. Específicamente se procesaron 27 archivos binarios correspondientes al barrido de elevación 0,9°, del primer volumen de la estrategia 0117. Esta última combina 15 barridos tipo staggered y 2 barridos tipo vigilancia. Los datos fueron generados el día 2 de marzo de 2017 a las 18 h (UTC). En la figura se observan blancos

meteorológicos al sur, las sierras de Córdoba al oeste y un conjunto de interferencias al norte, sur y sur-oeste.

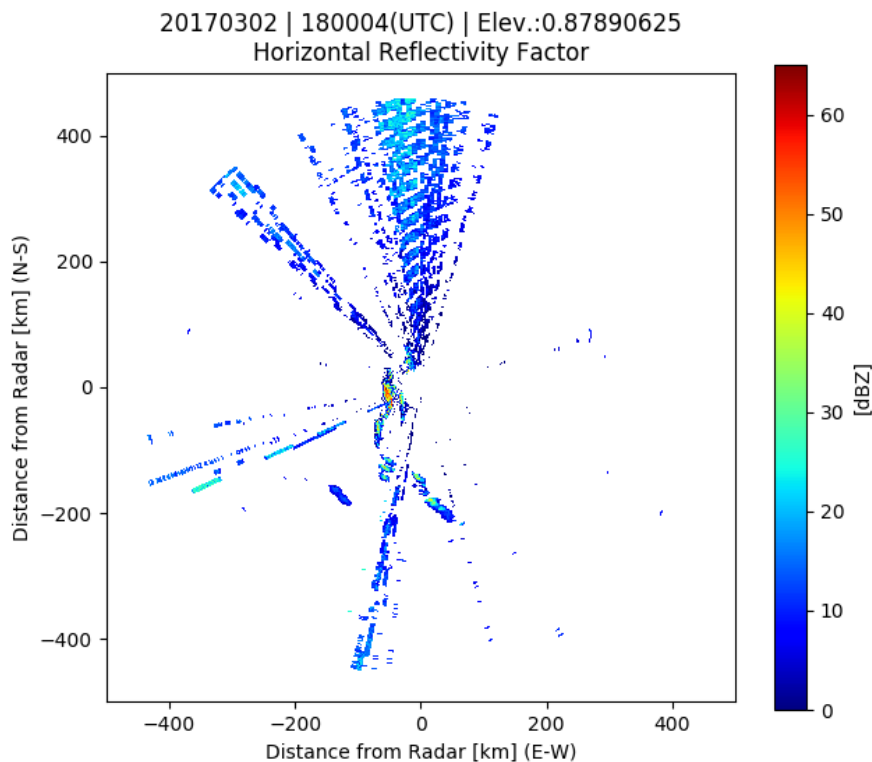


Figura 3.4: Barrido procesado utilizando el modo de ordenamiento convencional. Los datos fueron tomados por el RMA-1 el día 2/3/2017 a las 18 h (UTC).

3.3.3.2 Caso RMA: Aspectos de Implementación a Considerar.

Los radares monoestáticos movilizan típicamente el reflector parabólico mediante mecanismos dentados o correas de transmisión asociadas a motores eléctricos. Estos mecanismos limitan el movimiento del reflector a rotaciones con velocidades angulares constantes. Este modo típico de operación sumado al agrupamiento secuencial de pulsos tiene una serie de desventajas y problemas asociados. Adicionalmente, al momento de procesar los datos, pueden sumarse ciertos errores originados en aspectos de implementación propios de cada radar si estos no son tenidos en cuenta.

En particular, la velocidad de rotación acimutal de los radares meteorológicos se ajusta en función de la cantidad de pulsos por grupo que se deben emitir y del PRP configurado. El grupo completo de pulsos debería emitirse exactamente dentro de un grado acimutal de desplazamiento de la antena. Por otro lado, si bien no se tiene acceso al procesador de datos N1 del RMA por ser un software propietario de la empresa INVAP, realizando una análisis comparativo de los productos N2 generados por dicho instrumento², se presume que el procesador del mismo realiza un ordenamiento convencional de los datos al momento de procesarlos.

- a) **Inicio del Barrido en un Acimut Aleatorio** El momento en que se empiezan a emitir los pulsos podría derivar en errores de procesamiento. Del análisis de diversos barridos de datos N1 generados por el RMA-1 se deduce que el primer pulso electromagnético de cada conjunto de datos se emite en posiciones acimutales arbitrarias. Esto permite presumir que la emisión comienza una vez que se ha alcanzado la velocidad de rotación acimutal requerida para dicho

²Productos generados con la versión de enero de 2018 del procesador de datos N1 del RMA.

barrido y no en una posición acimutal entera o previamente fijada para comenzar el agrupamiento de los mismos.

- b) Degradación de la Resolución Angular del Radar** Como se mencionó anteriormente, el RMA distribuye la emisión de los pulsos pertenecientes a un determinado grupo durante el desplazamiento angular de 1° de la antena. Es decir, entre el centro del primer y último pulso del grupo hay una diferencia aproximada de 1° acimutal. Al agrupar pulsos cuyas posiciones centrales abarcan un grado acimutal se está integrando en realidad la información proveniente de dos grados acimutales, degradando así la resolución angular del radar.
- c) Desfasaje Acimutal a lo largo del Barrido** De los distintos conjuntos de datos procesados del RMA-1 se observa la existencia de un corrimiento en el ángulo acimutal de inicio de cada grupo de pulsos a lo largo de un barrido. Aproximadamente cada 13 grupos de pulsos se produce un corrimiento de $0,1^\circ$ en el ángulo acimutal del primer pulso del grupo. Esto significa que cada 130 grupos de pulsos habrá un corrimiento cercano a 1° . Por ejemplo, si el primer grupo de pulsos emitido para un determinado barrido tuvo un acimut inicial de 11° , el grupo de pulsos N° 130 tendrá un acimut de 142° cuando en realidad debería corresponderle un acimut de 141° . Se desconocen las causas de este patrón de funcionamiento.
- d) Grupo de Pulsos Extras** Del análisis del conjunto de datos del RMA-1 se ha observado que los mismos están constituidos por 362 grupos de pulsos, en vez de 360 grupos necesarios para completar un barrido con estrategia de escaneo tipo PPI y una antena con una resolución angular de 1° . Se presume que esta particularidad está vinculada al problema descrito en el punto anterior.
- e) Error de Apuntamiento Derivado** Si bien se desconoce la forma en que el procesador del RMA asigna los grupos de pulsos a los distintos acimuts geográficos, de emplearse un agrupamiento secuencial, se visualizan dos alternativas posibles para realizar dicha tarea. En primer lugar es necesario calcular la media de los valores acimutales de los pulsos constituyentes de un grupo. El valor medio de acimut del grupo es un número racional, generándose así la necesidad de tener que redondear el mismo a los fines de poder asignar la información a cierto sector acimutal geográfico. En relación al redondeo se visualizan dos alternativas, aplicar un redondeo buscando el entero más próximo superior o el entero más próximo inferior. El mecanismo elegido debe mantenerse a lo largo de todo el procesamiento del barrido ya que, de lo contrario, un redondeo al entero más próximo absoluto junto a los efectos de los ítems a y c producirían que a ciertos sectores acimutales geográficos no se les asigne información. El sistema de redondeo utilizado, el inicio con acimut aleatorio y el desfasaje acimutal a lo largo del barrido producen indefectiblemente que se genere para ciertos sectores acimutales un error de apuntamiento. Esto es, grupos de pulsos que son asociados a cierto sector acimutal geográfico son en realidad una combinación de mediciones coincidentes con dicho sector y de mediciones correspondientes a sectores aledaños anteriores o posteriores. Se genera así un efecto de desplazamiento o corrimiento de la información meteorológica en acimut y adicionalmente la duplicación o expansión de ecos meteorológicos en acimuts contiguos. Este efecto se ve amplificado en rangos lejanos del radar.

La Figura 3.5 resume los diferentes casos de errores de apuntamiento analizados. El caso A es el que introduce mayor error en el posicionamiento de la información mientras que el caso B realiza un posicionamiento óptimo de la misma. El caso C es un punto intermedio donde la información está levemente desplazada.

3.3.3.3 Agrupamiento Acimutal de Pulsos

De confirmarse las suposiciones anteriormente listadas deberían ser solucionados idealmente mediante una actualización de los subsistemas que intervienen en la emisión de pulsos del radar. Una

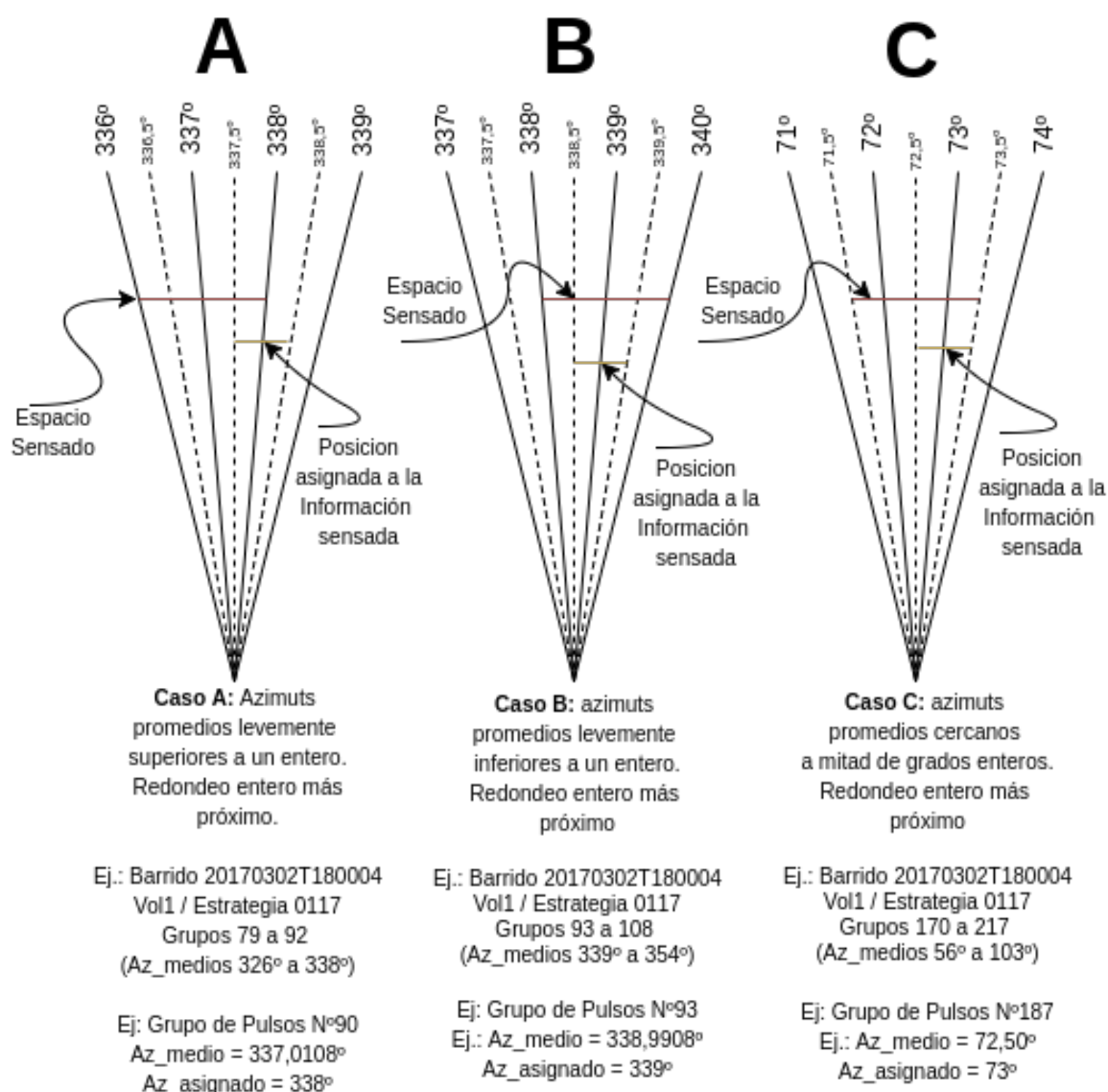


Figura 3.5: Casos de Errores de Apuntamiento detectados.

solución alternativa, sin embargo, es utilizar un enfoque diferente en el modo de agrupamiento y selección de los pulsos a procesar.

En este nuevo modo propuesto los pulsos son agrupados por su posición acimutal y no por el grupo al que pertenecen según el etiquetado original realizado por el RMA. De esta forma se corrige el problema de acimut aleatorio inicial, del desfase acimutal a lo largo del barrido y los consecuentes errores de apuntamiento.

Así son agrupados y procesados únicamente aquellos pulsos cuya posición acimutal central, según el registro del encoder del RMA, se encuentra dentro del margen de error fijado respecto al sector acimutal geográfico que se pretende representar. El margen de error configurable puede ir desde los $\pm 0,5^\circ$ hasta $\pm 0,05^\circ$. De esta forma se pueden alcanzar resoluciones angulares de hasta $1,1^\circ$.

La aplicación del método debería ir acompañada con modificaciones en las estrategias de operación ya que, de mantenerse el mismo número de pulsos por grupo para determinado barrido, se tiene el problema que a medida que se reduce el margen de error permitido mayor es el número de pulsos descartados. Un menor número de muestras utilizadas en el procesamiento estadístico

consecuentemente implica una disminución en la calidad de los productos N2 resultantes. Este efecto indeseado puede compensarse aumentando el número de pulsos por grupo, aunque debe tenerse en cuenta que dicho incremento está asociado indefectiblemente a un aumento proporcional en la duración total del barrido.

Las Figuras 3.6 y 3.7 muestran un mapa de la Ciudad de Córdoba superpuesto a un PPI de Z_h de un barrido generado por el RMA-1 el 16/1/2018. En ambas se han resaltado con un círculo rojo puntos de alta reflectividad, la mayor parte de ellos correspondientes a antenas de comunicaciones con estructuras metálicas reticuladas. Para la generación de la Figura 3.6 se utilizó el modo de agrupamiento acimutal con un margen de error de $\pm 0,1^\circ$, mientras que para la generación de la Figura 3.7 se utilizó el modo de agrupamiento secuencial.

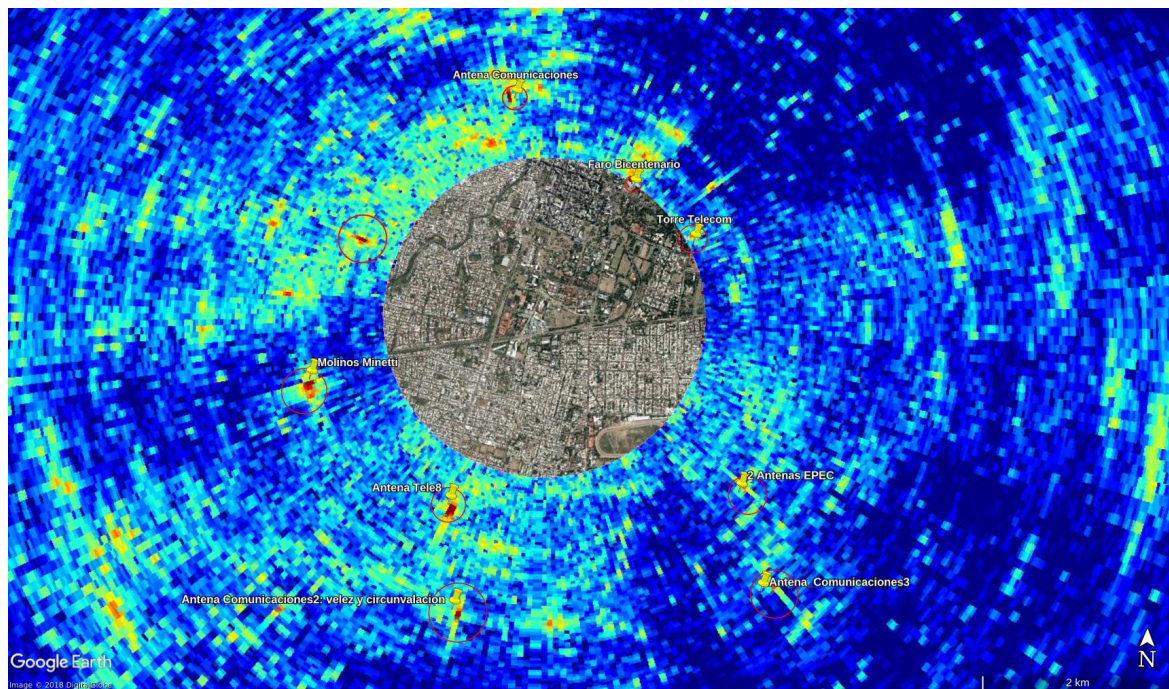


Figura 3.6: PPI de Z_h superpuesto a una imagen satelital de la Ciudad de Córdoba. Los datos N1 fueron procesados utilizando el modo de agrupamiento acimutal y un margen de error de $\pm 0,1^\circ$. Barrido generado por el RMA-1 el 16/1/2018 a las 10:34 h.

Las ventajas de aplicación de uno u otro modo de agrupamiento se aprecia claramente al comparar ambas figuras. Por ejemplo, al observar los círculos rojos sobre el mapa se aprecia como los blancos puntuales en el interior de los mismos aparecen bien definidos en la Figura 3.6 mientras que en la Figura 3.7 se observan ensanchados y/o rotados.

3.3.4 Procesamiento de Barridos

3.3.4.1 Procesador SinglePRF

Este módulo es el encargado del procesamiento general de los barridos. El mismo se encarga de la comunicación y sincronización con los restantes módulos de la biblioteca a los fines de llevar a cabo, en el orden listado, las siguientes tareas:

1. Carga y decodificación de los archivos IQ.
2. Generación de la matriz de datos N1.
3. Procesamiento de los datos de tiempo lento.
4. Sincronización de los múltiples procesos implicados en el procesamiento paralelo.

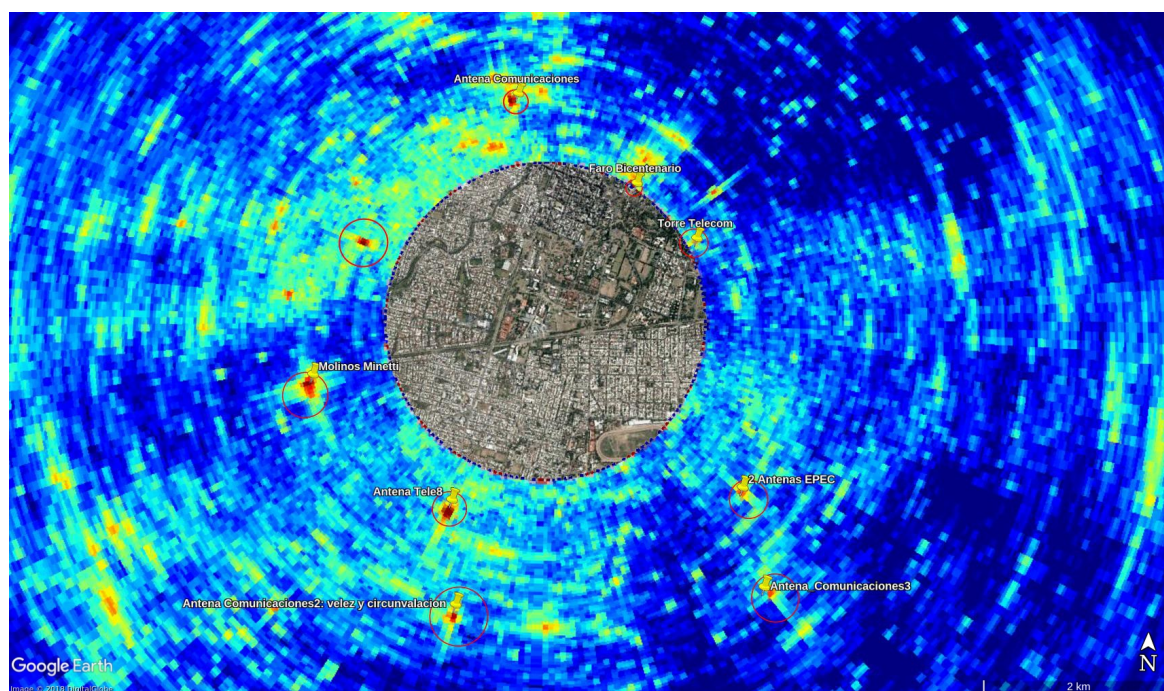


Figura 3.7: PPI de Z_h superpuesto a una imagen satelital de la Ciudad de Córdoba. Los datos N1 fueron procesados utilizando un agrupamiento secuencial. Barrido generado por el RMA-1 el 16/1/2018 a las 10:34 h.

5. Integración de celdas (opc.).
6. Filtrado de datos (opc.).
7. Almacenamiento de los productos N2 resultantes (opc.).
8. Generación de gráficos (opc.).

Previo al inicio de la ejecución del código, el usuario debe elegir que opciones desea activar configurando los respectivos parámetros asociados a cada uno de los puntos del listado anterior.

Inicialmente se debe indicar el barrido a procesar, los parámetros de la estrategia de operación correspondiente a dicho barrido (PRF, PW, Rango Máximo, etc), el tipo de agrupamiento de pulsos que se desea aplicar y los productos de nivel 2 que se desean generar. En lo que respecta al paralelismo se debe configurar el número de núcleos a comprometer en el procesamiento. La integración de los volúmenes de resolución obliga a definir el tamaño de la celda que se pretende obtener. Por otro lado, el filtrado de los datos requiere que se especifiquen los filtros a ser aplicados, pudiéndose optar por un filtro de blancos meteorológicos basado en ρ_{hv} y/o un filtro de interferencias. Finalmente el usuario debe configurar si desea guardar los datos N2 resultantes y/o si quiere generar los gráficos de los productos procesados.

Los **productos de Nivel 2** actualmente soportados son:

- Potencia Normalizada
- Factor de Reflectividad Horizontal (Z_h).
- Factor de Reflectividad Vertical (Z_v).
- Factor de Reflectividad Diferencial (Z_{dr}).
- Velocidad Doppler Radial - Canal Horizontal (V_{rad_h}).
- Velocidad Doppler Radial - Canal Vertical (V_{rad_v}).
- Ancho Espectral - Canal Horizontal (W_{rad_h}).
- Ancho Espectral - Canal Vertical (W_{rad_v}).
- Fase Diferencial (ϕ_{dp}).

- Fase Diferencial Específica (K_{dp})
- Coeficiente de Correlación (ρ_{hv})

3.3.4.2 Modo de Procesamiento Automático

El procesador de datos N1 del RMA soporta una serie de ‘tipos de procesamientos’, los cuales definen básicamente qué productos N2 deben generarse. Algunos de los ‘tipos de procesamientos’ actualmente implementados en dicho instrumento son: Intensidad, Vigilancia, Doppler, Doppler-SFR y Staggered.

A los fines de poder comparar los productos de N2 obtenidos con el paquete de software desarrollado con los generados por el RMA, se implementó una función que configura automáticamente los parámetros de procesamiento a utilizar en función de lo indicado en la estrategia de operación del radar para un barrido determinado.

La automatización del procesamiento requirió, adicionalmente, la implementación de un módulo de lectura automática de los parámetros de configuración establecidos para los distintos volúmenes y barridos, definidos en los archivos *.XML de las estrategias de operación del radar.

3.3.4.3 Paralelización

Evaluación del Problema de Paralelismo

El procesamiento de datos N1 es un problema altamente paralelizable.

La estructura de la matriz de datos N1 está organizada por grupos de pulsos correspondientes a los distintos acimuts. Esto nos permite, en primera instancia, realizar una división de los datos en paquetes conformados por 2 o más grupos de pulsos. El procesamiento de cada uno de estos paquetes de datos resulta ser un problema típico de **paralelismo de tareas**³. Implementando una solución adecuada se puede aprovechar la potencialidad de los procesadores multicore modernos. La performance del software se incrementa proporcionalmente en función de la cantidad de núcleos disponibles para el cálculo.

Por otro lado, durante el procesamiento de cada grupo de pulsos, se usan los distintos estimadores para obtener los productos N2 en cada una de las celdas de rango, es decir, el mismo conjunto de instrucciones debe repetirse tantas veces como celdas de rango existan a lo largo de un pulso. Esto es un problema típico de **paralelismo de datos**⁴. Una solución de alta performance y compatible con el diseño de la Biblioteca de Procesamiento de Datos N1 sería realizar este procesamiento utilizando GPGPU.

Paralelización del Procesamiento de Datos N1

A los fines de aprovechar la capacidad de procesamiento multicore de los procesadores modernos se optó por generar una solución de paralelismo que resuelva el primero de los problemas planteados en el apartado anterior.

Se detalla a continuación el procedimiento implementado:

1. Se divide el conjunto de datos en paquetes de grupos de pulsos.
2. Se crea un número determinado de procesos definidos por el usuario.
3. Se crea un vector de datos compartido entre los procesos.
4. Cada paquete de datos es asignado a un procesador distinto.
5. Los procesadores realizan, consecutivamente, las operaciones correspondientes sobre cada uno de los grupos de pulsos asignados. Los resultados son almacenados en el vector de datos compartido.

³Paralelismo de tareas: cada procesador ejecuta un conjunto de instrucciones distintas sobre el mismo u otros conjuntos de datos.

⁴Paralelismo de datos: cada procesador ejecuta la misma tarea sobre diferentes conjuntos de datos.

6. Por último se espera a la finalización de todos los procesos.

Un diagrama de secuencia del procesador de Datos N1 paralelizado, donde se detallan las interacciones y tiempos entre los distintos módulos intervinientes, se presenta en la Figura 3.8.

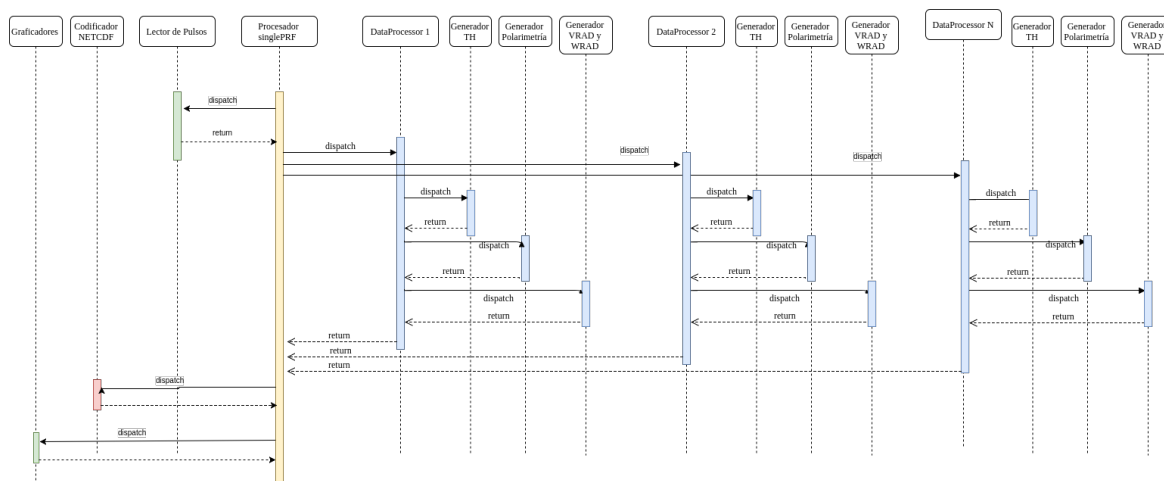


Figura 3.8: Diagrama de Secuencia del Procesador de Datos N1 Paralelizado

Herramientas de Paralelización

Para la implementación de las rutinas paralelas se utilizó el módulo ‘multiprocessing’ [Python Software Foundation, 2020], parte de la librería estándar del lenguaje de programación Python.

Intercambio de Datos entre Procesos El paquete ‘Multiprocessing’ incorpora herramientas para compartir datos entre procesos tanto a nivel local, utilizando memoria compartida, como de forma remota a través de una red. En lo que respecta a memoria compartida hay dos tipos de canales de comunicación entre procesos: ‘Queues’ y ‘Pipes’.

Sincronización entre Procesos Las herramientas del paquete incluyen diversas primitivas de sincronización, equivalentes a abstracciones convencionales como semáforos, monitores, etc. Locker y Manager son clases del paquete destinadas a esta tarea.

Memoria Compartida Los datos puede ser almacenados en mapas de memoria compartida utilizando clases especialmente diseñadas para tal fin como ‘Value’ y ‘Array’.

Generación de Procesos La generación de los nuevos procesos puede ser implementada mediante las técnicas de spawning, fork o server-fork. Esto le permite al programador un aprovechamiento óptimo de los procesadores disponibles.

Análisis de Rendimiento

Utilizando la herramienta Profiler, integrada de forma nativa en el entorno de desarrollo Spyder, se procesaron los datos de un barrido utilizando una rutina de procesamiento serie y otra paralela. A dicho fin, se utilizaron los datos de un barrido generado por el RMA-1 el día 23/9/17 a las 14:06 h (UTC) correspondiente al primer barrido y volumen de la estrategia 0122. La PC utilizada para la prueba tiene un microprocesador Quad Core Intel Core i7-4790K de 4GHz, placa madre ASUSTeK MAXIMUS VII RANGER y 16 GB de Memoria RAM.

Los parámetros de configuración establecidos para la prueba fueron:

- Agrupamiento secuencial.
- Generación de Z_h , Z_v , Polarimetría, V_{rad} y W_{rad}
- 8 núcleos de procesamiento.
- Generación de 1 Gráfico con 4 Subplots.

El tiempo total insumido en el procesamiento paralelo utilizando los 8 núcleos del microprocesador ascendió a 49,9 segundos, mientras que al utilizar un solo núcleo el tiempo requerido fue de 75,6 segundos. Cabe destacar que el periodo de lectura de los datos, realizado desde el disco rígido del sistema, está incluido en el tiempo total de procesamiento. Este proceso se realiza en serie y demora aproximadamente 10 segundos.

La diferencia de performance entre un método y el otro es mayor a medida que se incrementa el conjunto de datos a procesar, ya sea cantidad de pulsos y/o número de gates. En este ejemplo el barrido elegido cuenta con solo 19 pulsos por grupo y una rango máximo de 240 km.

3.3.4.4 Integración de Celdas

La resolución en rango del radar depende del ancho del pulso configurado. Por ejemplo, el ancho de pulso mínimo configurable en un RMA es de 400ns, lo que da una celda de resolución mínima de 60m.

Sin embargo, desde el punto de vista meteorológico no es práctico contar con celdas de tan corta longitud ya que los fenómenos atmosféricos típicos suelen encontrarse en el orden de la mesoescala. Celdas de 300, 500 o 1000 metros son comúnmente utilizados para la representación de fenómenos de este tipo.

Por lo tanto, el usuario puede definir que se realice la integración de 2 o más celdas contiguas una vez finalizado el procesamiento de los datos. En el caso de los RMA, lo óptimo sería definir un largo de celda múltiplo de 60 metros que evite un desplazamiento en rango de la información.

3.4 Filtrado de Datos de Nivel 2

3.4.1 Filtrado de Ruido y Ecos No Meteorológicos

El concepto de ruido es usado para representar a todas las señales indeseables que entran al receptor del sistema. Hay muchas fuentes potenciales, que pueden ser internas o externas a dicho receptor. Todos los objetos cuya temperatura física sea superior a 0 K generan ruido. Las contribuciones externas provienen del ruido cósmico de fondo, ruido galáctico, ruido debido a precipitaciones, ruido solar o de la Tierra, de estructuras cercanas como edificios o el propio radomo del radar, etc. [Bringi y Chandrasekar, 2001]. El ruido interno es generado por los circuitos eléctricos que son usados en la cadena de recepción, como por ejemplo ruido en amplificadores, ruido electrotérmico, electroquímico o electromecánico, entre otros.

La presencia de este fenómeno en las etapas de recepción analógica y digital puede afectar significativamente la calidad de los datos resultantes. Por lo tanto, se hace necesario implementar filtros que nos permitan mitigar el efecto del ruido sobre el conjunto de datos. Valiéndonos de las características para discriminar ecos no meteorológicos de ρ_{hv} es que se ha implementado un filtro simple de tipo árbol de decisión basado en dicha variable polarimétrica.

Las Figuras 3.9 y 3.10 muestran 4 PPI correspondientes a las variables polarimétricas Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} , de un barrido registrado por el RMA-1 el 2/3/2017. La Figura 3.9 fue procesada y graficada sin filtros, mientras que a la Figura 3.10 se le aplicó el filtro de ruido propuesto. De la comparación de ambas figuras puede apreciarse el efecto significativo que resulta de la aplicación del filtro sobre el conjunto de datos. Una buena parte de las celdas ruidosas han sido suprimidas sin evidencia de haber afectado a las celdas con datos válidos.

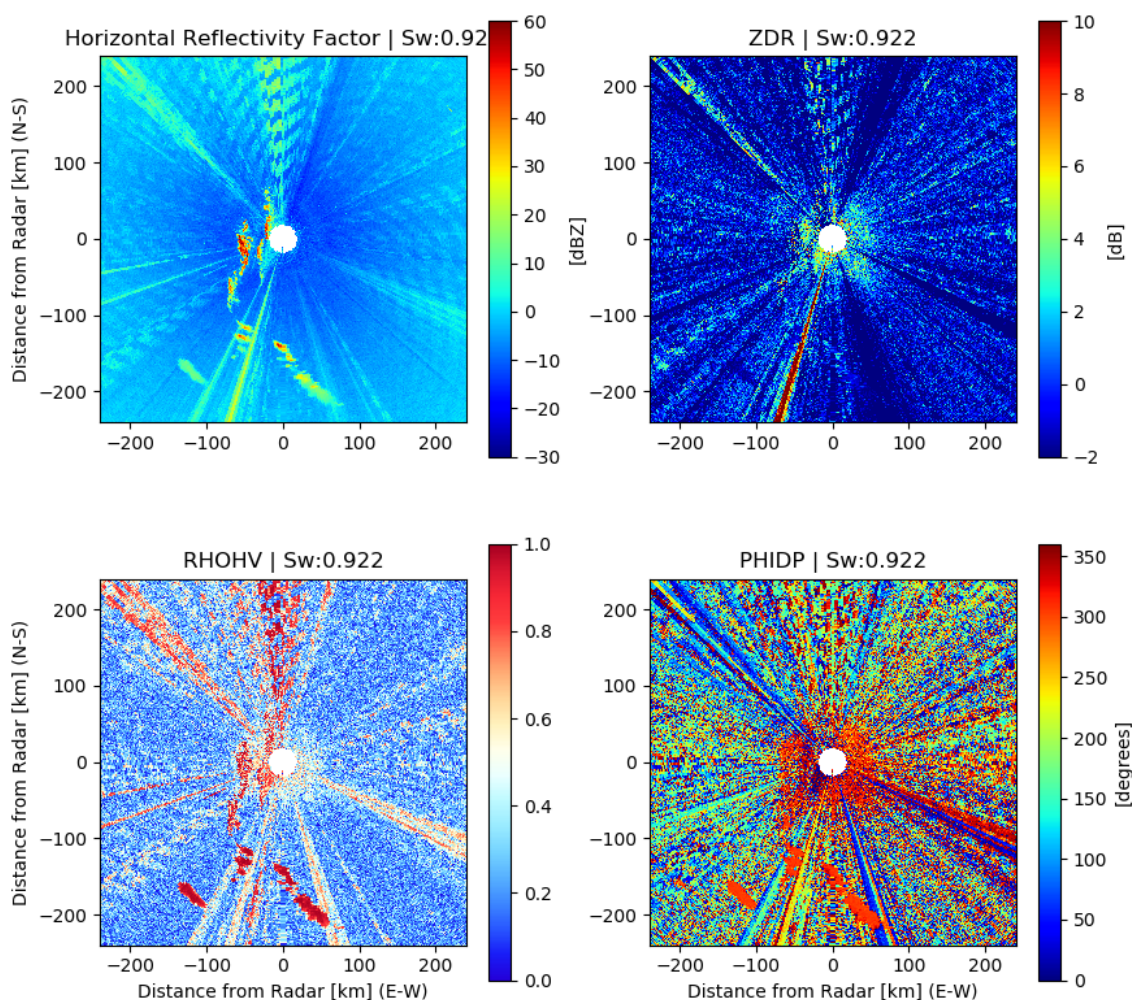


Figura 3.9: PPI de Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} sin filtros aplicados. Barrido generado por el RMA-1 el día 2/3/2017 a las 18:07 h (UTC).

3.4.2 Filtrado de Interferencias

Los sistemas de comunicaciones externos que operan incorrectamente en la banda reservada para los radares meteorológicos suelen interferir su funcionamiento. Gráficamente las interferencias son fáciles de identificar ya que generalmente se manifiestan afectando 1 o más radiales completos, es decir, se observan valores continuos desde el origen hasta el alcance máximo del radar. Las interferencias también pueden manifestarse presentando una forma espiralada, dependiendo del tipo de modulación utilizada en el transmisor externo. Los fenómenos atmosféricos no suelen presentarse con ninguno de este tipo de morfologías.

Los RMA, en particular, se ven afectados por fuentes transmisoras externas que operan en la banda de los 5,4 a 5,8MHz. Son de especial interés los transmisores punto a punto que se encuentran en línea de visión con la antena del radar y routers WiFi ubicados en las proximidades del radar operando en la banda de 5GHz. En las Figuras 3.9 y 3.10 pueden observarse varias interferencias en las mediciones del RMA-1.

La cantidad e intensidad de interferencias afectando los radares pueden degradar significativamente los datos registrados por dichos instrumentos. Es por ello que se hace necesario contar con filtros que permitan discriminar y eliminar las interferencias durante la etapa de procesamiento. A dicho fin se

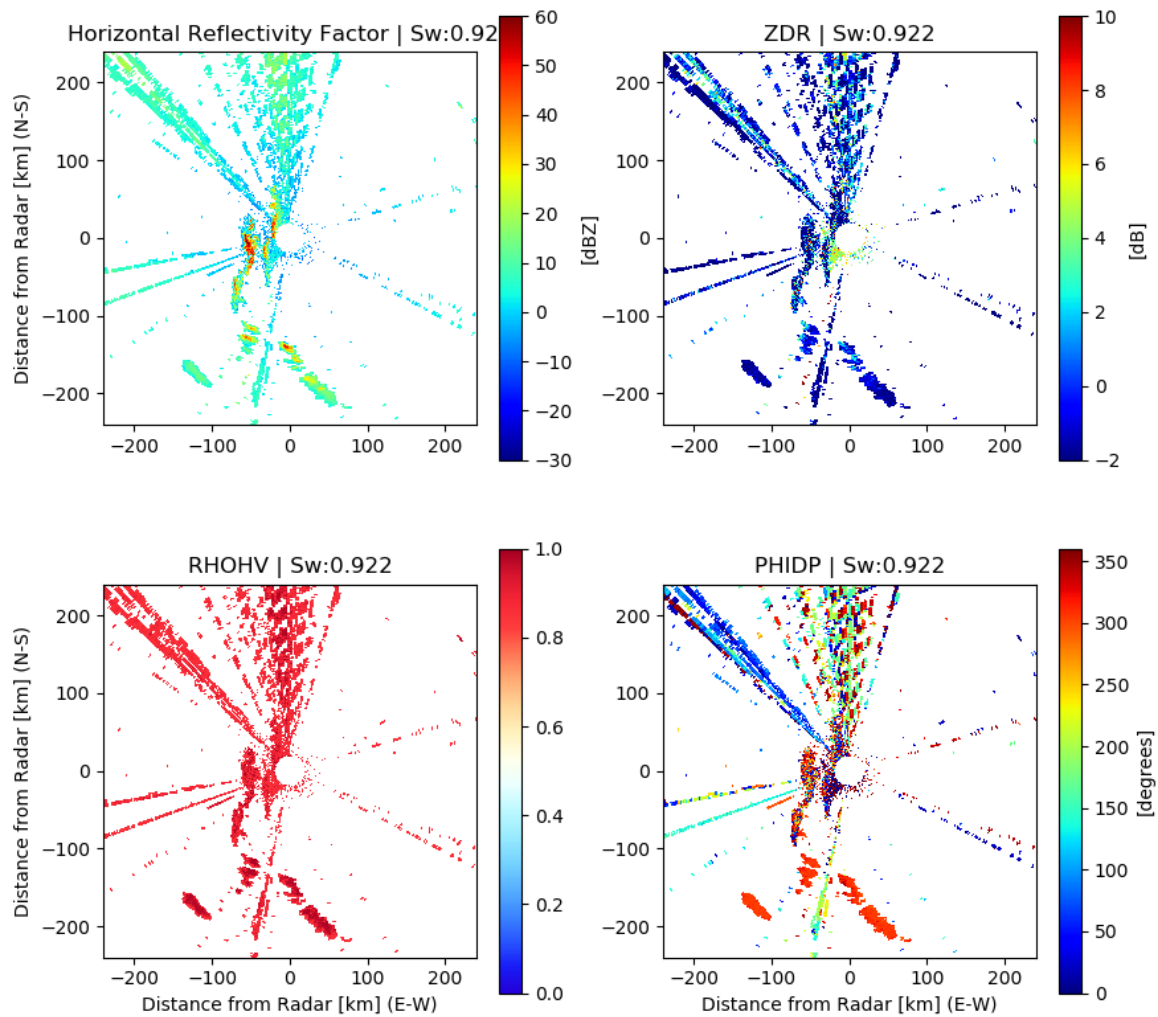


Figura 3.10: PPI de Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} con filtro de ruido. Se pueden observar con mayor nitidez los blancos meteorológicos presentes en el sur, el clutter proveniente de las Sierras de Córdoba al oeste y muchos radiales interferidos al norte. Barrido generado por el RMA-1 el día 2/3/2017 a las 18:07 h (UTC).

implementó un filtro para atenuar el efecto de las mismas procurando de no afectar significativamente los blancos meteorológicos.

La Figura 3.11 muestra nuevamente el conjunto de datos del barrido ilustrado en las Figuras 3.9 y 3.10 pero ahora con el filtro de interferencias aplicado. Realizando la comparación de las 3 figuras se puede observar un correcto desempeño del mismo. El filtro elimina gran parte de las interferencias sin evidencia de recorte de blancos meteorológicos.

3.5 Almacenamiento de Datos N2

Los datos de Nivel 2, resultantes del procesamiento realizado a los datos N1, son almacenados utilizando el formato NetCDF, destinado a la creación, acceso, e intercambio de información científica vectorial.

A continuación se listan algunas de las características destacables del formato que fundamentaron su elección:

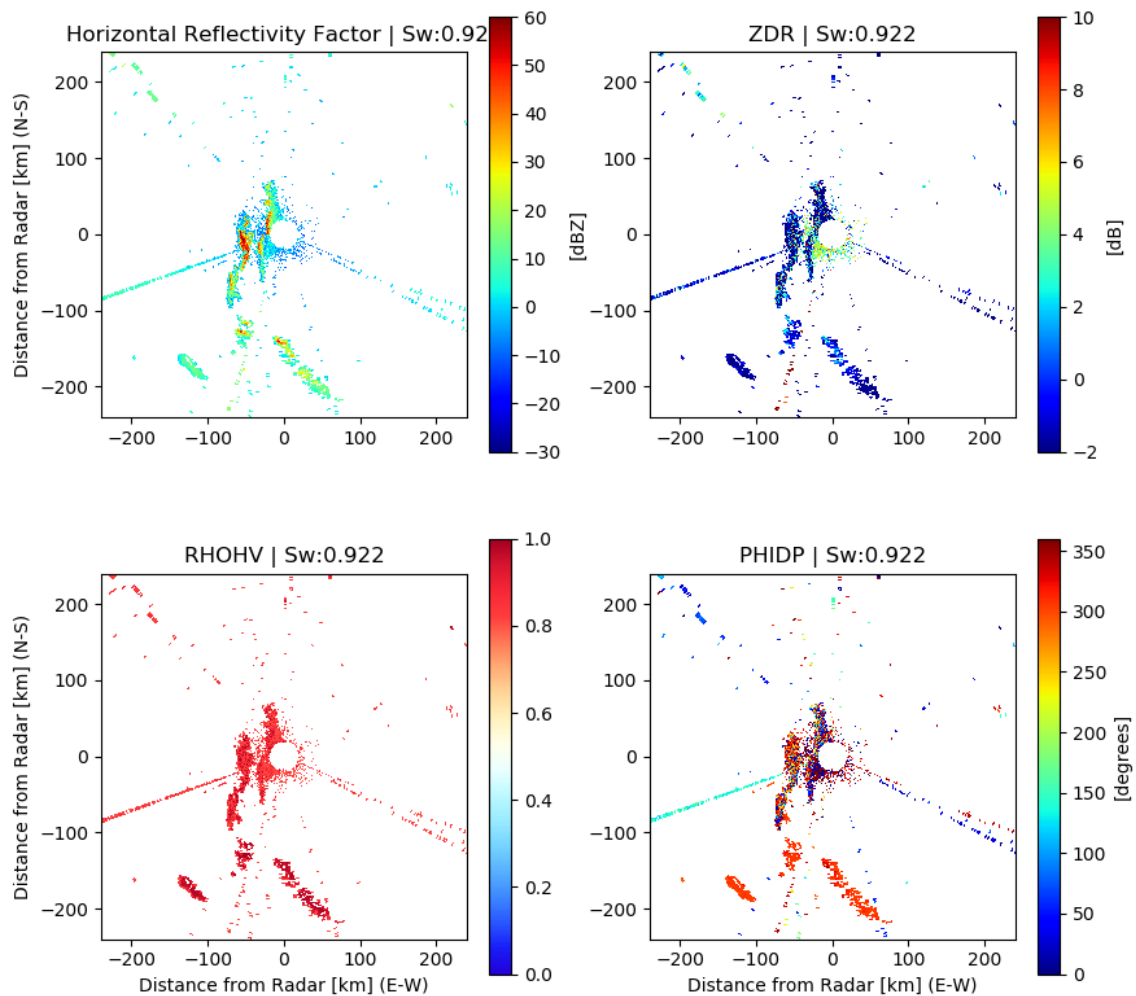



Figura 3.11: PPI de Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} con filtro de ruido e interferencias. Barrido generado por el RMA-1 el día 2/3/2017 a las 18:07 h (UTC).

- Es autodescriptivo (facilita la manipulación de los datos).
- Un amplio ecosistema de herramientas soportan el formato. Esto facilita la manipulación de los datos y la portabilidad a otros formatos conocidos.
- El tamaño de los archivos es relativamente pequeño. Este varía dependiendo del rango máximo establecido para el barrido procesado y las condiciones climáticas presentes al momento de realizar el escaneo de radar. Mayor es el tamaño final de los archivos cuanto mayor es el número de hidrometeoros presentes en la atmósfera. Un archivo típico varía entre 30 y 50 MB.
- Es un estándar internacional del Consorcio Abierto Geoespacial (Open Geospatial Consortium). La web principal del proyecto está administrada por el Programa Unidata perteneciente a la Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica de los EE.UU. (Unidata program at the University Corporation for Atmospheric Research - UCAR).



4. Calibración Electrónica Absoluta de un Radar Meteorológico

4.1 Métodos de Calibración Absoluta

La calibración electrónica absoluta de un radar meteorológico es una tarea de extrema importancia para obtener datos confiables y mediciones precisas de variables meteorológicas directas y derivadas.

Los subsistemas de los radares están afectados en general por distintas fallas y pérdidas, como pueden ser fallas en el transmisor/receptor, pérdidas de potencia en las guías de onda, juntas rotativas, duplexores, radomo, lóbulos secundarios de la antena, entre otras, degradando en conjunto las mediciones obtenidas. Es necesario, entonces, detectar y cuantificar dichas pérdidas a los fines de poder corregir los datos registrados.

En el caso de los radares meteorológicos uno de sus objetivos es determinar el valor del factor de reflectividad equivalente con el menor grado de incerteza posible. Un error de 3 dB en esta variable, por ejemplo, podría causar una sobreestimación del 100 % en la precipitación estimada.

Diversos autores han propuesto métodos para la calibración absoluta de radares meteorológicos, a continuación se resumen alguno de ellos.

Inyección o Transmisión de Señales

Este método de calibración se basa en la inyección de una señal conocida en la etapa de recepción del radar o mediante la medición de una señal transmitida desde una antena cercana.

En ambos casos la cadena de transmisión (transmisor, guías de onda, junta rotativa, magicT, antena, etc) no es caracterizada en absoluto y la cadena de recepción (antena, magicT, junta rotativa, guías de onda, muestreadores, digitalizadores, etc) es caracterizada parcialmente en el primer caso. En cualquiera de ambas aproximaciones no se alcanza una calibración absoluta de todo el sistema radar.

Radiación Solar

La técnica de calibración solar consiste en medir la radiación proveniente del sol, la cual es conocida para las distintas regiones de la Tierra y ha sido utilizada con cierto éxito en radares meteorológicos. Si bien la radiación solar llena $0,53^\circ$ del haz del radar no se puede considerar que se está ante una situación de blanco distribuido ya que la mayoría de los radares son diseñados con resoluciones angulares superiores a $0,5^\circ$. Las fluctuaciones del flujo solar obligan a que los datos medidos sean comparados con mediciones patrones correspondientes al mismo día y región. Adicionalmente, esta técnica requiere contar con receptores de alta sensibilidad ya que las señales recibidas del flujo solar se encuentran en el orden de los -100 dBm [Sarchilli y col., 1995].

Blancos Reflectantes

La calibración absoluta puede ser realizada utilizando blancos reflectantes estándares (ej.: esferas, esquinas reflectoras diédricas, etc.) cuyas superficies de RCS sean conocidas. Se comienza suspendiendo el blanco de calibración, mediante algún medio de sustentación (ej: globos con hidrógeno/helio, drones, etc.), en una región libre de clutter y de obstrucciones naturales o antropogénicas. Posteriormente se configura una estrategia de operación adecuada para realizar múltiples mediciones del blanco de prueba con el radar. Finalmente, la constante de radar es calculada mediante la comparación de los resultados obtenidos en la medición y el valor de Factor de Reflectividad Equivalente (Z) teórico calculado a partir de las propiedades físicas del blanco.

Este método ha sido utilizado por diversos autores [Scarchilli y col., 1995] [Duthoit y col., 2017] y será la aproximación que utilizaremos en este trabajo a los fines de realizar la calibración electrónica absoluta del RMA-1.

4.2 Conceptos Teóricos**4.2.1 Constante de Radar**

Los archivos binarios de los radares meteorológicos generalmente almacenan la potencia recibida y transmitida para cada pulso o, en su defecto, la potencia recibida normalizada por la potencia del pulso transmitido. En el primer caso, la potencia normalizada puede obtenerse fácilmente mediante la siguiente expresión:

$$P_n = \left[\frac{P_r}{P_t} \right] \quad (4.1)$$

Recordemos la Ecuación (2.28) que definía Z en función de los parámetros de radar:

$$Z = \left[\frac{P_r}{P_t} \right] \left[\frac{2^{10} (2 \ln 2) \lambda^2 r^2}{G_t^2 \pi^3 \theta^2 c \tau |k_w^2| L^2 l_r} \right] \left[10^{18} \right] \quad (2.28)$$

Si reemplazamos la Ecuación (4.1) en la (2.28) y operamos, nos queda:

$$Z = [P_n] \left[\frac{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 r^2 10^{18}}{G_t^2 \pi^3 \theta^2 c \tau |k_w^2| L^2 l_r} \right] \quad (4.2)$$

Al segundo término de la Ecuación (4.2) lo denominaremos β' , esto es ¹:

$$\beta' = \frac{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 10^{18}}{G_t^2 \pi^3 \theta^2 c \tau |k_w^2| L^2 l_r} \quad (4.3)$$

Luego, reemplazando (4.3) en (4.2), tenemos:

$$Z = \beta' P_n r^2 \quad (4.4)$$

Finalmente, despejando β' de la Ecuación (4.4), obtenemos:

$$\beta' = \frac{Z}{P_n r^2} \quad (4.5)$$

¹Técnicamente lambda podría ser excluido de la constante de radar ya que es factible tener un registro de la frecuencia de transmisión en tiempo real y de esta forma poder contemplar los corrimientos en frecuencia que presente el transmisor (magnetron, klystron, etc). Para poder aplicar esto es necesario tener acceso a dicha información del radar.

Para poder determinar β' debemos obligatoriamente conocer Z ya que tenemos un sistema de dos incógnitas y una sola ecuación. Una forma de resolver este problema es utilizando un blanco de prueba estándar cuya RCS sea conocida.

Esta aproximación implica ubicar el blanco seleccionado en algún lugar fuera zona de conformación del campo lejano de la antena y luego medir el mismo con el radar. La medición nos permitirá calcular la potencia normalizada recibida por el radar mientras que el conocimiento de las características del blanco nos posibilitará determinar el Factor de Reflectividad Equivalente teórico que debería tener el mismo teniendo en cuenta su RCS y rango al radar.

Este es el procedimiento que se sigue en el presente trabajo para determinar la constante de radar, y se ha optado por utilizar una esfera reflectante como blanco de prueba.

Reescribiendo la Ecuación (4.5) para incluir el concepto del Z teórico (Z_{teo}), nos queda:

$$\beta' = \frac{Z_{teo}}{P_n r^2} \quad (4.6)$$

En resumen, para determinar el valor de la constante de radar β' , debemos conocer la posición exacta del objetivo de medición, la potencia normalizada medida por el radar y el valor del Z_{teo} del blanco de prueba.

4.2.2 Z teórico del blanco de calibración

A los fines de obtener una expresión que nos permita calcular Z_{teo} recordemos la Ecuación (2.12) que define la sección transversal de radar para un blanco distribuido y las Ecuaciones (2.16) y (2.17) que describen los respectivos términos de σ , estas son:

$$\sigma = \eta V \quad (2.12)$$

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |k_w^2| \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (2.16)$$

$$V = \frac{\pi \theta^2 r^2 c \tau}{8} \quad (2.17)$$

Luego, reemplazando las ecuaciones (2.16) y (2.17) en la Ecuación (2.12), obtenemos:

$$\sigma = \left[\frac{\pi^6 \theta^2 c \tau |k_w^2| r^2}{8 \lambda^4} \right] Z \quad (4.7)$$

La Figura 4.1 muestra las diferentes regiones aplicables al cómputo de la RCS para una esfera. La región óptica rige cuando $\frac{2\pi r}{\lambda} > 10$. En esta región la RCS puede aproximarse según el área geométrica de la esfera, esto es:

$$\sigma \approx \pi r_{esf}^2 \quad (4.8)$$

Donde r_{esf} es el radio de la esfera.

La relación entre la RCS y la sección geométrica de una esfera, incluso dentro de la región óptica, es una función oscilante, sin embargo esta variación es despreciable para tamaños considerables de blancos de prueba. Por ejemplo, para el caso de una esfera de prueba de 46 cm de diámetro el valor estimado de σ tiene un margen de error de 0,1 dB. La Figura 4.2 muestra esta relación para distintos diámetros. Este es el caso, como se verá en el apartado 4.4.1, del blanco de prueba elegido para el presente trabajo.

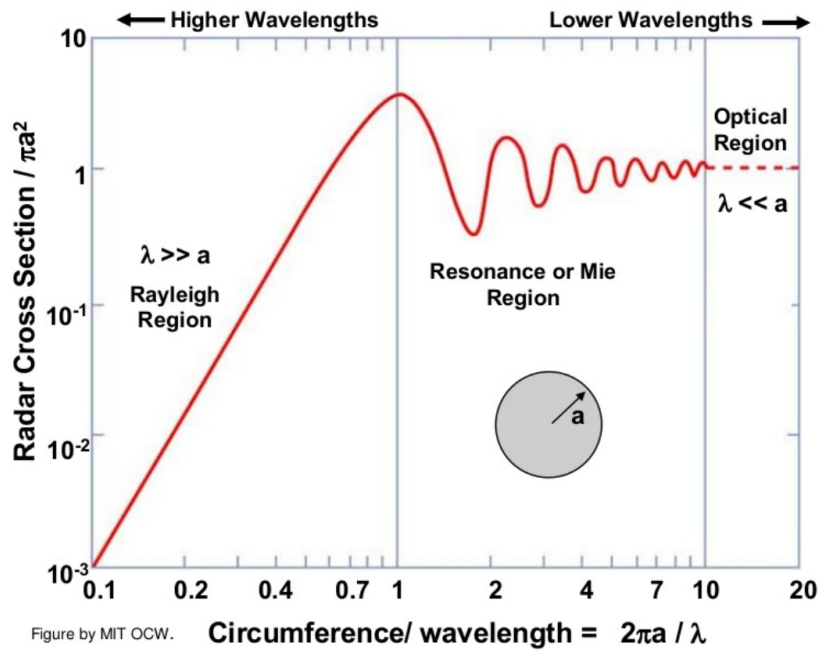


Figura 4.1: Se muestra la RCS normalizada de una esfera ($\sigma/\pi r_{esf}^2$) en función de la relación entre circunferencia de la misma y la longitud de onda del radar ($2\pi r_{esf}/\lambda$). Se muestran adicionalmente las regiones de Rayleigh, Mie y óptica. Fuente MIT, 2020.

Si reescribimos la Ecuación (4.7) despejando Z de la misma, nos queda:

$$Z_{teo} = \left[\frac{8\lambda^4}{\pi^6 \theta^2 c \tau |k_w^2| r^2} \right] [\sigma][10^{18}] \quad (4.9)$$

Luego, reemplazando la Ecuación (4.8) en la (4.9) y simplificando, obtenemos:

$$Z_{teo} = \left[\frac{8\lambda^4}{\pi^6 \theta^2 c \tau |k_w^2| r^2} \right] [\pi r_{esf}^2][10^{18}] \quad (4.10)$$

$$Z_{teo} = \frac{8 \lambda^4 r_{esf}^2 10^{18}}{\pi^5 \theta^2 c \tau |k_w^2| r^2} \quad (4.11)$$

Donde:

- τ es la frecuencia del receptor del radar
- θ = el ancho del lóbulo principal de la antena del radar.

4.3 Procedimientos para el Procesamiento de Datos

En la presente sección se detallan los procedimientos a llevar a cabo sobre los datos N1, registrados en la prueba de calibración, para calcular la constante de radar, determinar el error de apuntamiento en acimut y elevación, el corrimientos en rango, y obtener las gráficas de caracterización del lóbulo principal en acimut, elevación y rango.

Constante de Radar

Para el cálculo de la constante de radar se establece el siguiente procedimiento:

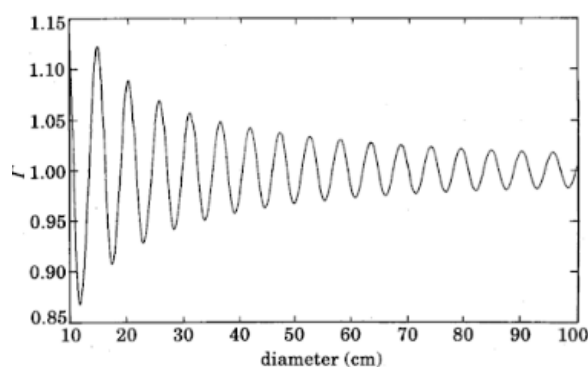


Figura 4.2: Relación entre la RCS y el diámetro de una esfera.

- a) Localizar el blanco, según sus coordenadas geográficas tomadas en sitio, respecto a las coordenadas de radar en acimut y rango.
- b) Detectar el acimut y rango de máxima reflectividad de un determinado sector acimutal.
- c) Almacenar la potencia normal de la celda detectada en el punto anterior.
- d) Calcular Z Teórico del blanco de prueba tomando en cuenta su material, RCS y distancia al radar.
- e) Calcular la constante de radar para dicho barrido.
- f) Repetir los puntos c, d y e en todos los barridos de la misma elevación en los que se pudo registrar al blanco de calibración. Se almacena cada uno de estos resultados parciales.
- g) Calcular el promedio de todos los resultados parciales. Este resultado es la nueva constante del radar.

Error de Apuntamiento de la Antena en Acimut

A este fin se estableció el siguiente procedimiento:

- a) Elegir 3 o más blancos fijos elevados (torres, edificios angostos, antenas, etc) que presenten alta reflectividad a elevaciones superiores a $0,5^\circ$ y estén ubicados en las inmediaciones del radar. Se debe tener cuidado que en dicho sector no haya más de un blanco de alta reflectividad.
- b) Para cada uno de los blancos elegidos determinar su posición geográfica utilizando algún Sistema de Información Geográfica tipo Google Earth u otro.
- c) Detectar el acimut y rango de máxima reflectividad proveniente de cierto sector acimutal.
- d) Elegir una cantidad estadísticamente significativa de barridos de una misma elevación, tomados en un día de aire claro con una estrategia que contenga una densidad de puntos elevada (idealmente 128 pulsos o más).
- e) Calcular y almacenar las diferencias entre el acimut de máxima reflectividad de cada blanco fijo con su correspondiente acimut geográfico para cada uno de los barridos procesados.
- f) Calcular el promedio del conjunto total de diferencias almacenado. Este valor es el error de apuntamiento de la antena en acimut.

Error de Apuntamiento de la Antena en Elevación

Para el cálculo de este error se plantea el siguiente procedimiento².

- a) Diseñar y activar una estrategia que utilice barridos RHI. Se debe configurar para escanear el sector acimutal en donde se encuentra ubicado el blanco de calibración.
- b) Crear una rutina para detectar la elevación de máxima reflectividad del blanco de calibración.

²Este procedimiento no ha podido ser aplicado en las pruebas de calibración realizadas debido a que, por el momento, no es factible configurar estrategias de escaneo tipo RHI en el RMA-1.

- c) Tomar la elevación exacta del blanco de prueba mediante la combinación de sensores como barómetros y GPS.
- d) Elegir una cantidad estadísticamente significativa de escaneos del mismo sector vertical, tomados en un día de aire claro con una estrategia que contenga una densidad de pulsos elevada (idealmente 128 pulsos o más).
- e) Calcular y almacenar las diferencias entre la elevación de máxima reflectividad del blanco de calibración con su correspondiente elevación sensada para cada uno de los escaneos procesados.
- f) Calcular el promedio del conjunto total de diferencias almacenado. Este valor es el error de apuntamiento de la antena en elevación.

Perfil de Potencia en Acimut

Para gráfica del perfil de potencia en acimut se establece el siguiente procedimiento:

- a) Localizar el acimut y rango de la celda de máxima reflectividad correspondiente al blanco de prueba. Se toma dicha celda y acimut como referencia.
- b) Graficar los valores de potencia para la celda de referencia usando un conjunto de pulsos centrados en el acimut de referencia.

Esta representación permite caracterizar del lóbulo principal de la antena en acimut.

Perfil de Potencia en Elevación

Para graficar del perfil de potencia en elevación se desarrolla el siguiente procedimiento:

- a) Ubicar la elevación y rango de la celda de máxima reflectividad correspondiente al blanco de prueba. Se toma dicha celda y elevación como referencia.
- b) Graficar los valores de potencia para la celda de referencia usando un conjunto de pulsos centrado en la elevación de referencia.

Esta representación permite caracterizar el lóbulo principal de la antena del radar en elevación.

Perfil de Potencia en Rango

Para obtener esta gráfica se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Ubica el acimut y rango de la celda de máxima reflectividad correspondiente al blanco de prueba. Se toma dicha celda y acimut como referencia.
- b) Graficar los valores de potencia para el acimut de referencia utilizando un conjunto de celdas centradas en la celda de referencia.

4.4 Calibración Electrónica Absoluta del RMA-1

En este apartado se detallan los procedimientos y aspectos tenidos en cuenta para realizar una prueba de Calibración Electrónica Absoluta del RMA-1.

Se comienza realizando un análisis sobre distintos blancos de calibración disponibles y posibles medios de elevación, luego se evalúa el clutter de la Ciudad de Córdoba y se realiza un análisis de los requerimientos y posibles sitios. Posteriormente, se describen en detalle las pruebas a realizar y se repasan los criterios a tener en cuenta para el diseño adhoc de una estrategia de operación. Finalmente se describen las pruebas realizadas y se presentan los resultados.

Teniendo en cuenta que el RMA-1 es un radar de serie, el análisis y procedimientos desarrollados en el presente apartado son directamente extrapolables a todos los radares RMA del país.

4.4.1 Blancos de Calibración

En función de lo desarrollado en el apartado 4.2.2 se opta por utilizar como blanco de calibración una esfera reflectante. A continuación se detallan las dos opciones evaluadas para la realización de las pruebas:

Esfera hueca de telgopor recubierta de aluminio

- Diámetro: 0,46 m.
- Material: Telgopor.
- Recubrimiento: Papel Aluminio.
- Peso: 236 g (sin recubrimiento).
- Peso: 350 g (con recubrimiento).

Este elemento, fotografiado en la Figura 4.3, fue fabricado especialmente para la prueba. Al ser una esfera hueca de telgopor tiene la ventaja de ser muy liviana en relación a su tamaño. Su diámetro de 46 cm nos brinda un blanco de prueba adecuado para realizar, además de la calibración del radar, una caracterización precisa del lóbulo de radiación principal de la antena del RMA.



Figura 4.3: Esfera recubierta con aluminio de 46 cm de diámetro.

Esfera hueca de aluminio

- Diámetro: 0,15 m.
- Material: Aluminio.
- Peso: 116 g.

Esta esfera, mostrada en la Figura 4.4, forma parte de las herramientas de calibración de un radar de trayectografía propiedad de la Fuerza Aérea Argentina (FAA). Tiene como ventaja que es liviana y está fabricada íntegramente en aluminio, lo que evita deformaciones ante posibles esfuerzos de tracción y rugosidades en la superficie. La principal desventaja es su reducido diámetro.

Si bien el diámetro de la esfera de aluminio sería adecuado para llevar a cabo la prueba de calibración, no es óptimo para realizar una caracterización detallada del lóbulo de radiación primario de la antena. Es por esto que se optó por utilizar como blanco de prueba la primera de las opciones presentadas.

4.4.2 Medios de Elevación

La prueba de calibración implica que el blanco de prueba sea suspendido en el aire por un cierto tiempo a determinada altura y distancia del radar. Teniendo esto presente se evalúan dos posibles medios de elevación, estos son:



Figura 4.4: Esfera de aluminio de 16 cm de diámetro.

Globos Cautivos

Este es el medio utilizado históricamente para llevar a cabo pruebas de calibración de radares con esta metodología.

La elección del mismo implica inflar globos de látex u otro material con gases livianos como Helio o Hidrógeno. Adicionalmente, se requiere desplegar en campo un sistema de tensores que permitan mantener al blanco cautivo y en posición, evitando que el viento desplace el mismo durante las mediciones. Se necesita inflar uno o más globos para poder sustentar el peso del blanco de prueba, tensores, globos y todo otro elemento que sea integrado en el blanco.

La gran ventaja de este sistema es la posibilidad de mantener en suspensión el blanco de calibración por un período de tiempo muy extenso. Como contraparte, el blanco de prueba no es fácil de mantener completamente estático, aún con el conjunto de tensores desplegados en campo. Adicionalmente, si no se cuenta con un proveedor de Helio accesible se deberán tomar todas las medidas de seguridad apropiadas para la manipulación y el uso de Hidrógeno.

Vehículos Aéreos No Tripulados

Los Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV, por sus siglas en Inglés "Unmanned Aerial Vehicle") o drones se presentan como una muy buena opción a los fines de llevar a cabo la prueba de calibración [Duthoit y col., 2017].

El drone a utilizar debe estar diseñado para soportar una carga útil considerable que incluya el blanco de prueba, tensores y algún otro elemento adicional requerido.

Las ventajas más importantes de estos vehículos son la estabilidad de vuelo y los sistemas de geoposicionamiento integrados. Esto nos permite mantener el drone en un punto específico, previamente georeferenciado, a una altura determinada y por un período de tiempo adecuado. Si bien esto último es cierto, las baterías de los drones comerciales más comunes suelen durar entre 15 y 30 minutos por lo que, superado este tiempo, se deberá contar con baterías adicionales o suspender la prueba hasta tanto se recarguen las baterías.

Adicionalmente, la posibilidad de posicionar y mantener el blanco exactamente en un punto determinado nos brinda la posibilidad no solo obtener la constante de radar y caracterizar el lóbulo de radiación de la antena, sino también de conocer el error de apuntamiento del radar.

Un aspecto no menor, a los fines de determinar la constante de radar con la mayor precisión posible, es que se debe alejar el drone de la zona de medición del lóbulo principal de la antena. Esto obliga a tener que suspender el blanco a una distancia considerable del drone, empeorando significativamente el balanceo del mismo.

Para el presente trabajo se contó con un UAV con las siguientes características técnicas:

- Marca: FotoAérea-Drones.
- Altura Máxima: 500 m.
- Carga Máxima Soportada: 1,5 kg.
- Autonomía: 18 a 25 minutos dependiendo de la carga y desplazamiento.
- Sensor de Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en Inglés "Global Positioning System") incorporado: Modulo Compass u-blox Neo M8N. La Figura 4.5 resume las características generales del sensor, mientras que la Figura 4.6 detalla los valores relacionados a la precisión horizontal del mismo.

Model	Category	GNSS			Supply	Interfaces	Features	Grade
	Standard Precision GNSS High Precision GNSS Dead Reckoning Timing	GPS / QZSS GLONASS Galileo BeiDou	Number of Concurrent GNSS	1.65 V - 3.6 V 2.7 V - 3.6 V	UART USB SPI DDC (iC compliant)	Programmable (Flash) Data logging Additional SAIV Additional LNA RTC crystal Oscillator Built-in antenna Built-in antenna supply and supervisor Timepulse	Standard Professional Automotive	
NEO-M8N	•	• • • •	3	•	• • • •	• • • • • T	1	

Figura 4.5: Especificaciones del Modulo Compass u-blox Neo M8N.

Parameter	Specification				
Receiver type	72-channel u-blox M8 engine GPS L1C/A, SBAS L1C/A, QZSS L1C/A, QZSS L1 SAIF, GLONASS L1OF, BeiDou B1I, Galileo E1B/C				
Accuracy of time pulse signal	RMS	30 ns			
	99%	60 ns			
Frequency of time pulse signal	0.25 Hz...10 MHz (configurable)				
Operational limits ¹	Dynamics	± 4 g			
	Altitude	50,000 m			
	Velocity	500 m/s			
Velocity accuracy ²	0.05m/s				
Heading accuracy ²	0.3 degrees				
GNSS	GPS & GLONASS	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo
Horizontal position accuracy ³	2.5 m	2.5 m	4 m	3 m	TBC ⁴

Figura 4.6: Performance del Modulo Compass u-blox Neo M8N. La precisión horizontal de 2,5 m del GPS, teniendo en cuenta que el sitio de prueba deberá localizarse a menos de 3 km del radar y que el ancho del lóbulo principal a dicha distancia es de 52,3 m, nos asegura una precisión de posicionamiento acimutal de al menos $\pm 0,1^\circ$.

4.4.3 Análisis del Mapa de Clutter del RMA1.

Ubicación y Perfiles de Elevación de Terreno

A los fines de contextualizar la localización del RMA-1, la Figura 4.7 muestra una imagen satelital de la Ciudad de Córdoba, ampliada en su zona central y superpuesta a círculos concéntricos al RMA1 con radios de: 1740, 2000, 2500 y 3000 m. A su vez, las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los perfiles de elevación de terreno correspondientes a los círculos concéntricos al RMA1 para 2000, 2500 y 3000 m respectivamente. En todas las figuras el extremo derecho representa el acimut 0° y va creciendo hacia la izquierda.

Detalle de los Barridos Utilizados

Los datos utilizados para el análisis fueron adquiridos por el RMA-1 el día 23/9/2017 entre las 14 y 15 h bajo condiciones meteorológicas óptimas, registrándose aire claro en todo el área de cobertura



Figura 4.7: Foto satelital de la Ciudad de Córdoba superpuesta a círculos concéntricos al RMA1 con radios de: 1740, 2000, 2500 y 3000 m

del radar. Esto último asegura que el eco registrado por el radar se corresponde únicamente a clutter de terreno y construcciones antropogénicas.

Los barridos utilizados pertenecen al volumen número 1 de la estrategia de operación 0122. Este está integrado por 15 barridos con elevaciones de 0,5; 0,7; 0,9; 1,3; 1,8; 2,3; 3,1; 4,0; 5,1; 6,4; 8; 10; 12,5; 15,6 y 20°, los cuales fueron generados usando 32 pulsos por grupo acimutal, una PRF de 625 Hz, un ancho de pulso de 1600 ns y un alcance máximo de 238 km de rango.

Mapas de Clutter por Elevación

Las Figuras 4.11, 4.12, y 4.13 están compuestas por 3 subfiguras, dos gráficas PPI de mapas de clutter filtrados, uno por un umbral de Z_h alto y otro por uno bajo, y por un PPI del mapa de clutter superpuesto a una imagen satelital; para las elevaciones de 0,74; 1,32 y 2,30° respectivamente. Las subfiguras (a) nos permiten detectar rápidamente zonas con presencia de construcciones antropogénicas o elevaciones de terreno que afecten las posibles pruebas de calibración a realizar. La subfiguras (b), por el contrario, nos permite determinar zonas con muy bajo clutter factibles de ser consideradas como posibles sitios de prueba. Finalmente, las subfiguras (c) permiten evaluar aspectos de logística limitantes para la realización de las pruebas in situ como acceso al lugar, obstáculos, seguridad, etc.

Consideraciones Generales

Del análisis de los gráficos presentados en este apartado se destacan una serie de aspectos, estos son:

- La región circundante al radar registra en general amplias zonas contiguas con elevada potencia de clutter. Estas zonas coinciden comúnmente con elevaciones de terreno superiores a los 440 m de altitud y/o con edificaciones de elevada altura.



Figura 4.8: Perfil de elevación de terreno descrito por un círculo de 2000 m de radio centrado en el RMA1.

- En elevaciones sucesivas, como es de esperar, la potencia media del clutter de terreno disminuye. Sin embargo, hay determinadas zonas donde el clutter registrado aumenta levemente entre elevaciones sucesivas. Si bien se desconoce el origen de este fenómeno se supone que proviene de la contribución de lóbulos secundarios.
- Se observa un desplazamiento en acimut de aproximadamente 1.1° de la información registrada por el radar respecto al geoposicionamiento de las imágenes satelitales de Google Earth.

4.4.4 Evaluación y Selección de Sitios

Aspectos a Considerar

Para la elección del sitio de prueba se consideraron los siguientes aspectos:

- La zona tiene que estar ubicada en el rango comprendido entre los 1740 (primera celda de información dentro del campo lejano de la antena del radar) y los 3000 m. El rango máximo se define teniendo en cuenta el incremento en la altitud de las sucesivas celdas de radar en función del rango y las limitaciones de los medios de elevación con los que se cuenta.
- Debe ser una zona de fácil acceso, preferiblemente de acceso público y contar con la seguridad apropiada.
- El sitio debe estar libre de obstáculos en altura como arbolera, tendidos eléctricos, construcciones civiles, etc.
- El radar deberá registrar en dicha zona baja intensidad de potencia de clutter para varias celdas contiguas.
- Se deberán priorizar aquellos sitios donde, a igualdad de condiciones, las zonas de baja potencia de clutter se registren a menor elevación.

Selección de Sitios

Del análisis de los perfiles de elevación, mapas de clutter y las consideraciones realizadas en el punto anterior, se identificó una zona ideal para la realización de las pruebas que cuenta con las siguientes características:

- Se ubica en la región comprendida entre los radiales 47° a 65° y desde los 1740 a 3000 m de rango.



Figura 4.9: Perfil de elevación de terreno descrito por un círculo de 2500 m de radio centrado en el RMA1.

- Se registran en dicha región amplias zonas de celdas contiguas con valores de reflectividad inferiores a 0 dBZ, correspondientes a potencia de clutter de terreno, para barridos de $0,7^\circ$ de elevación o superiores.
- Se ubica sobre el Parque Sarmiento de la Ciudad de Córdoba, es de fácil acceso, tiene sectores libres de obstáculos en altura y se puede establecer un cerco perimetral para evitar la circulación de personas.

Es interesante destacar que, según los perfiles de elevación, esta zona coincide con una región cuya elevación media se encuentra por debajo de los 440 m de altitud, elevación a la que se encuentra la base de la torre del RMA1.

Se seleccionaron 3 posibles sitios en la zona, los cuales son detallados a continuación: **Sitio PS0:**

- Latitud: $-31,431087^\circ$.
- Longitud: $-64,170249^\circ$.
- Elevación de Terreno: 418 m.

Sitio PS1:

- Latitud: $-31,429833^\circ$.
- Longitud: $-64,172909^\circ$.
- Elevación de Terreno: 422 m.

Sitio PS2:

- Latitud: $-31,428332^\circ$.
- Longitud: $-64,174878^\circ$.
- Elevación de Terreno: 428 m.

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran los sitios seleccionados. La Figura 4.14 es una imagen satelital de la zona superpuesta a un PPI de Z_h registrado por el RMA1 a una elevación de $0,74^\circ$. En esta se muestran únicamente las celdas con valores comprendidos entre 0 y -30 dBZ. La Figura 4.15, adicionalmente, muestra el PPI de Z_h de forma aislada junto con la escala de colores utilizada para la representación de ambas gráficas.



Figura 4.10: Perfil de elevación de terreno descrito por un círculo de 3000 m de radio centrado en el RMA1.

4.4.5 Descripción de la Prueba

4.4.5.1 Procedimiento General

En este apartado se describe el procedimiento general seguido para la realización de las pruebas, diferenciado según el medio de elevación utilizado.

Drone

- a) Se activa la estrategia 5902, que consta de 5 elevaciones.
- b) Se eleva el drone sin carga a 562 m de altitud. Este paso es necesario si no se contempla la separación adecuada entre el drone y blanco de prueba para que el lóbulo principal del radar no se vea afectado por el RCS del drone mientras se realizan las mediciones.
- c) Se activa la estrategia 5900 o 5901, con el drone y la esfera en superficie.
- d) Se esperan al menos dos ciclos completos de la estrategia.
- e) Se eleva el drone con la carga hasta la posición predeterminada.
- f) Se mantiene estable el vehículo por al menos dos ciclos de la estrategia.

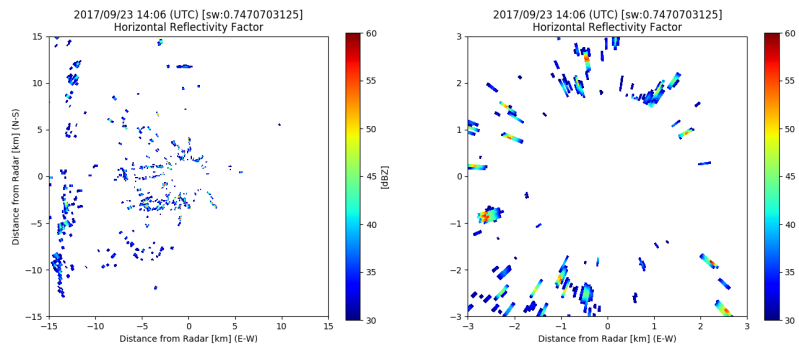
Globos Cautivos:

- a) Se activa la estrategia 5900 o 5901, con la esfera en superficie.
- b) Se esperan al menos dos ciclos completos de la estrategia.
- c) Se eleva la esfera de prueba hasta la posición predeterminada.
- d) Se mantiene suspendido el blanco por al menos dos ciclos de la estrategia. Los tensores, ubicados en cada uno de los 4 puntos cardinales, deben ir siendo desplegados a medida que el blanco asciende a los fines de mantenerlo en posición. La elevación final del blanco se determina con un tensor central. Este último tiene un largo de 144 m, mientras que los restantes tensores tienen una extensión de 150 m y son ubicados a 40 metros del punto central.

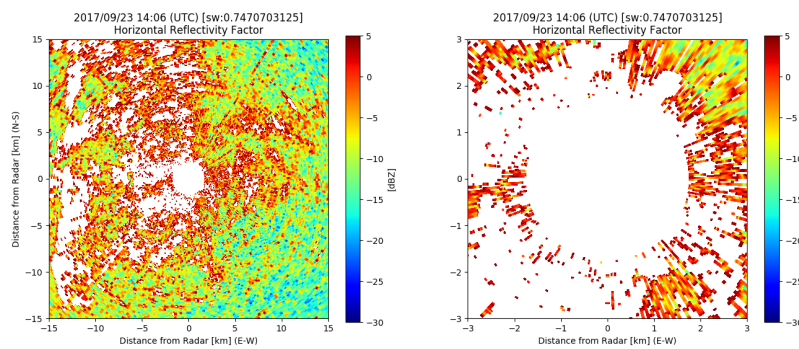
4.4.5.2 Descripción de Etapas

A continuación se detallan las distintas etapas del procedimiento seguido para la realización de la prueba experimental. Este es genérico para ambos medios de sustentación a pesar que algunas gráficas fueron ilustradas con drones.

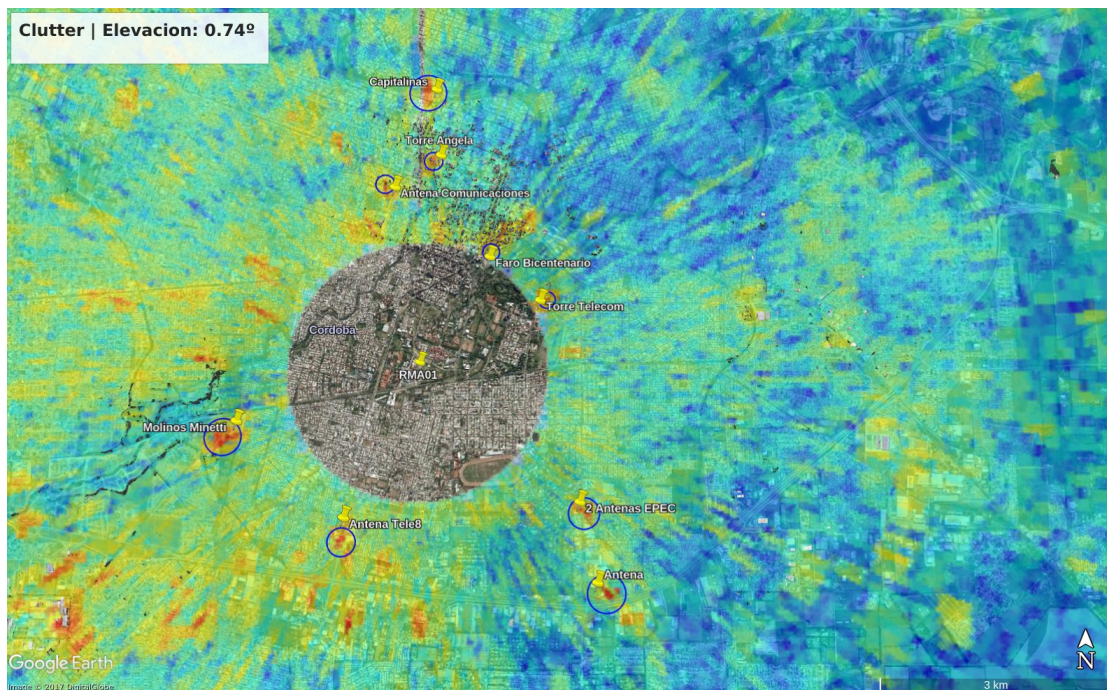
Localización de los Elementos



(a) Mapa de clutter con un filtro de umbral de Z_h alto.

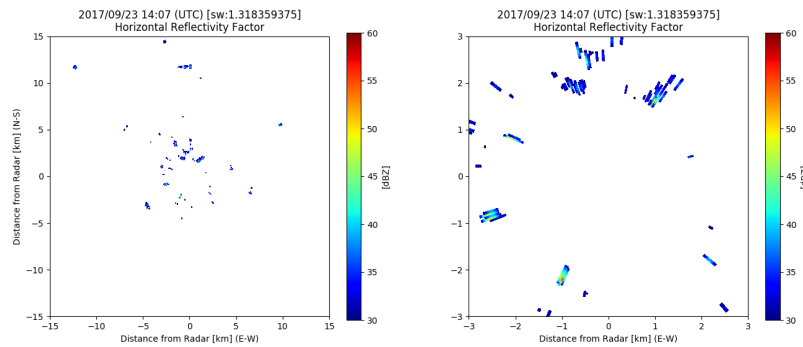
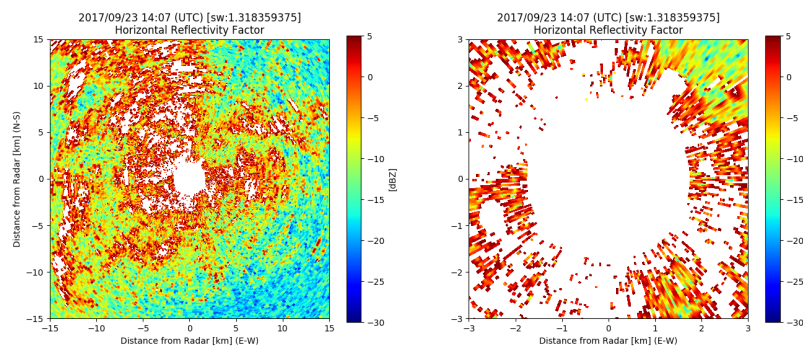
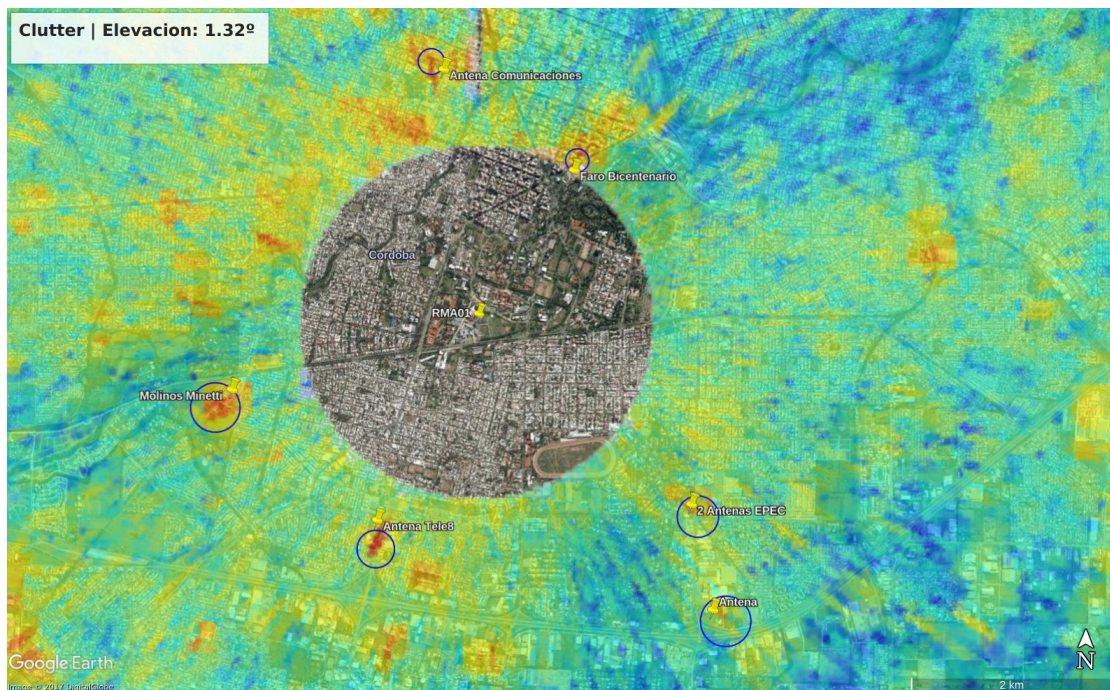


(b) Mapa de clutter con un filtro de umbral de Z_h bajo.



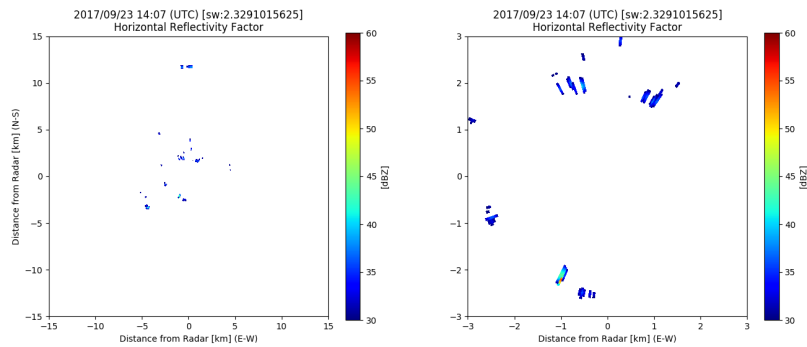
(c) Mapa de clutter superpuesto a imagen satelital.

Figura 4.11: Análisis del mapa de clutter en las proximidades del RMA-1 para la elevación de $0,74^\circ$.

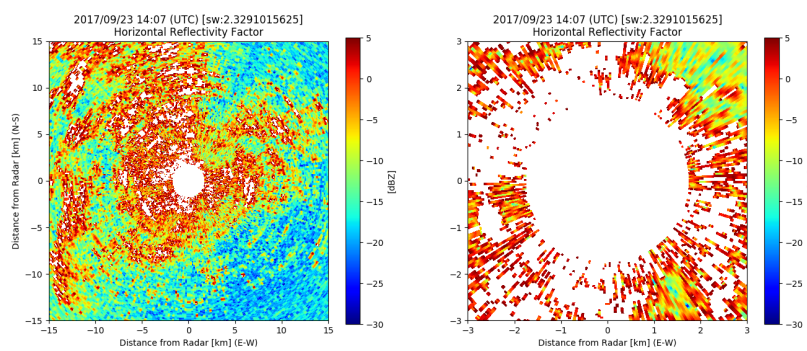
(a) Mapa de clutter con un filtro de umbral de Z_h alto.(b) Mapa de clutter con un filtro de umbral de Z_h bajo.

(c) Mapa de clutter superpuesto a imagen satelital.

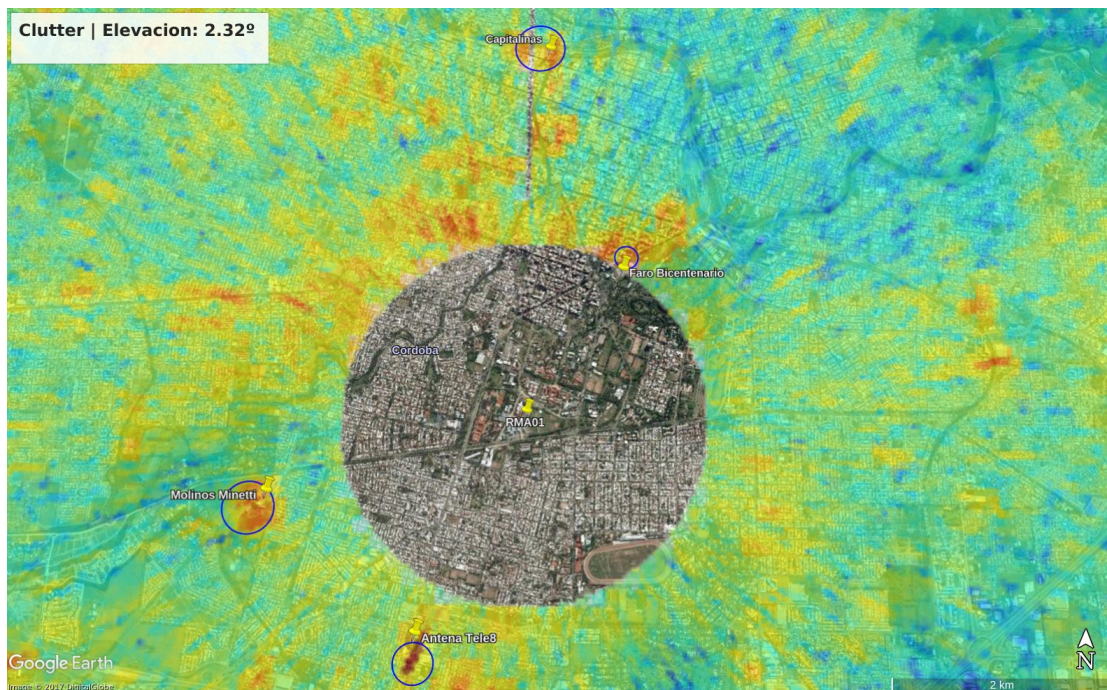
Figura 4.12: Análisis del mapa de clutter en las proximidades del RMA-1 para la elevación de $1,32^\circ$.



(a) Mapa de clutter con un filtro de umbral de Z_h alto.



(b) Mapa de clutter con un filtro de umbral de Z_h bajo.



(c) Mapa de clutter superpuesto a imagen satelital.

Figura 4.13: Análisis del mapa de clutter en las proximidades del RMA-1 para la elevación de $2,30^\circ$.

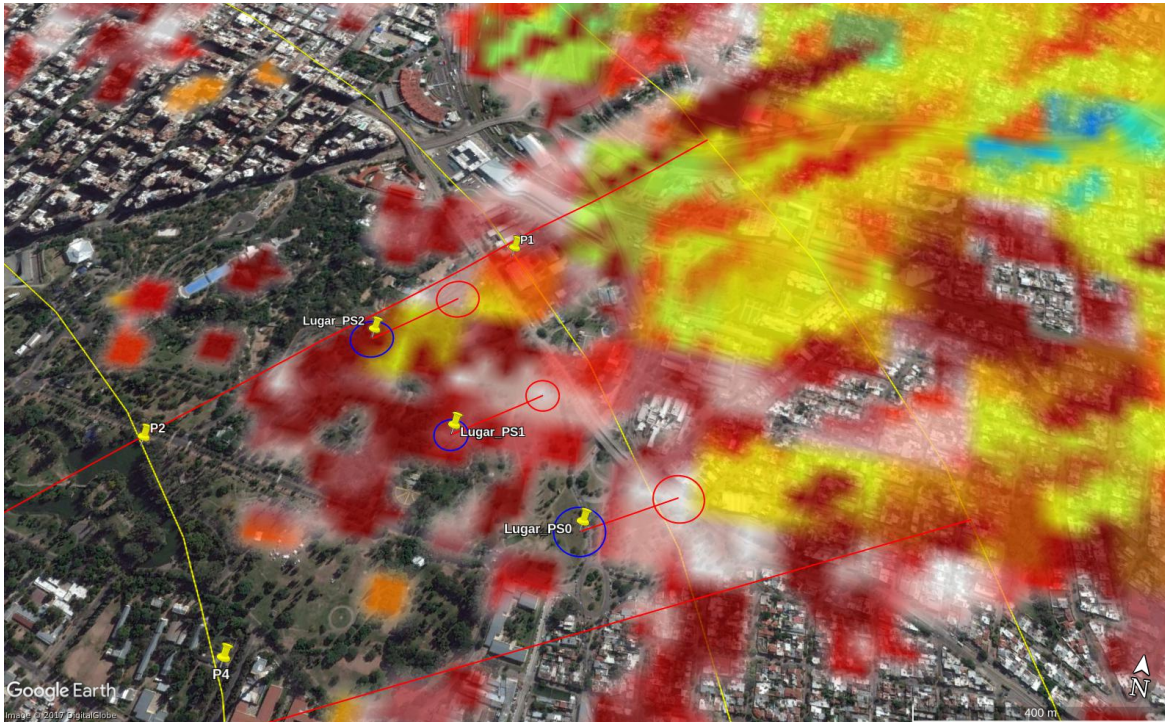


Figura 4.14: Imagen satelital ampliada del Parque Sarmiento de la Ciudad de Córdoba superpuesta a un PPI de Z_h registrado por el RMA1 a una elevación de $0,74^\circ$. La escala de colores utilizada se muestra en la Figura 4.15.

- Esfera de Calibración: la parte superior de la esfera debe ubicarse a 562 m de altitud. Esto es independiente del medio de elevación. Se utilizan las coordenadas geográficas determinadas en la selección del sitio.
- Caso Drone: si se desea que el drone no interfiera con la medición debe ser elevado 68 m por arriba de la esfera, es decir ubicarse a 630 m de altitud. Si no es posible alejar el drone de la esfera, como ya se mencionó, se debería realizar una medición previa únicamente con el UAV presente para luego poder discriminar dicha potencia.

La Figura 4.16 ilustra 4 estadios distintos de la prueba de calibración, las cuales se corresponden a elevaciones de radar de $0,7$; $1,3$; $1,9$ y $2,4^\circ$, respectivamente. La Figura 4.16a ilustra el haz inicial de medición donde el blanco de prueba aún se encuentra fuera del lóbulo principal de la antena. La Figura 4.16b ilustra el estadio límite a partir del cual, por arriba de dicha elevación ($1,3^\circ$), el lóbulo principal de la antena comienza a sensar el blanco de prueba. La Figura 4.16c ilustra la elevación del radar donde blanco de prueba se encuentra en la posición central del lóbulo principal de la antena. Finalmente, la Figura 4.16d muestra el estadio a partir del cual, por arriba de dicha elevación ($2,4^\circ$), el blanco de prueba queda fuera del alcance del lóbulo principal de la antena. En el caso de realizar la prueba con un drone, si se opta por no sensar el mismo, ésta es la última elevación utilizable de acuerdo a dicha condición.

En el ANEXO A: ‘Calibración Electrónica’ se detallan todas las elevaciones y posicionamientos teóricos del lóbulo principal de la antena para cada uno de los barridos componentes de la estrategia de operación utilizada en la calibración.

4.4.6 Diseño de la Estrategia de Radar

El diseño de la estrategia de operación del radar, a utilizar durante la prueba experimental, debe ser realizado teniendo en cuenta el blanco de calibración, el medio de elevación, la posición y elevación

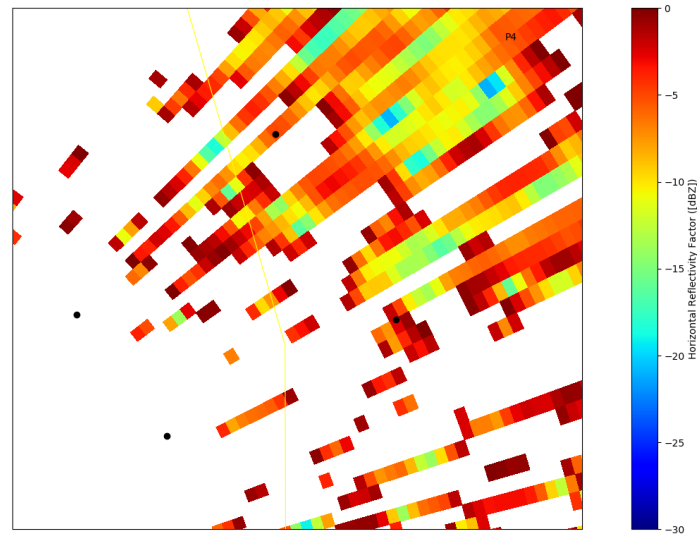


Figura 4.15: PPI ampliado de la zona del Parque Sarmiento de la Ciudad de Córdoba a una elevación de $0,74^\circ$. Los puntos negros se corresponden con los Pines 1,2,3 de la Figura 4.14.

final del blanco y el clutter de la zona, entre otros.

A continuación se describen muchos de estos aspectos a considerar:

Máxima Resolución Espacial

Se necesita maximizar la resolución espacial a los fines de poder identificar con precisión el rango exacto del blanco de calibración. Es decir, se debe configurar al radar con el mínimo ancho de pulso soportado. En el caso del RMA el ancho de pulso mínimo permitido es de 400 ns, lo que da como resultante una celda con resolución espacial de 60 m.

Si bien la minimización del ancho de pulso implica una disminución de la SNR en la señal recibida, esto no representa un problema en esta situación. La potencia a recibir producto de la medición del blanco se encuentra muy por arriba del piso de ruido.

Mínima Duración Temporal

Se necesita minimizar la duración total del volumen a utilizar. Es decir, debe seleccionarse la mínima PRP soportada por del sistema. Este requisito es mandatorio si el medio de elevación utilizado es un drone.

Para el caso del RMA la PRP mínima configurable es de $400 \mu s$. Notar que la PRP y el PW elegidos respetan el ciclo de trabajo máximo del transmisor.

Cabe mencionar que la reducción de la PRP implica un rango máximo no ambiguo de 60 km, aunque en este caso es más que suficiente para la realización de la prueba.

Máxima Precisión en Elevación

El RMA tiene un error de apuntamiento de $\pm 0,1^\circ$ por lo que solo podrá utilizarse la décima de grado como unidad mínima entre elevación y elevación. Esta limitación condiciona la confección del perfil en elevación del lóbulo principal de la antena pero no afecta el cálculo de la constante de radar ni la caracterización en acimut de dicho lóbulo. La Figura 4.17 ilustra la precisión de apuntamiento vertical de la antena del RMA.

De lo expuesto en el apartado 4.4.5.2, se determina que las elevaciones a utilizar irán desde $0,7$ hasta $2,9^\circ$ con saltos de $0,1^\circ$.

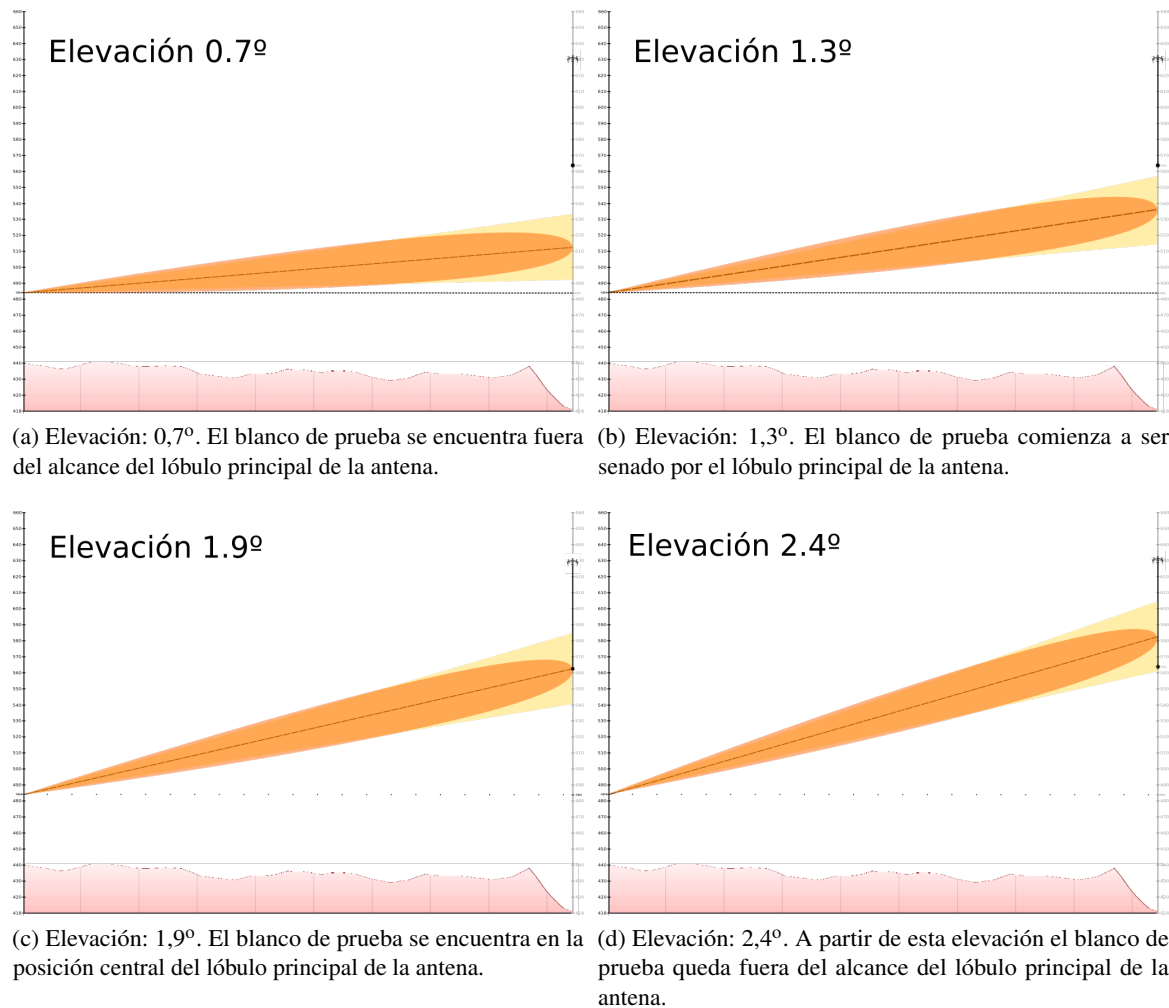


Figura 4.16: Diagrama ilustrativo de la prueba de calibración con el blanco ubicado en la posición y altitud del sitio de prueba. Se muestran las elevaciones de radar de $0,7^\circ$; $1,3^\circ$; $1,9^\circ$ y $2,4^\circ$.

Máxima Precisión en Acimut

Teóricamente el valor exacto de la constante de radar se obtiene cuando el centro del lóbulo principal de la antena de un pulso emitido por el radar coincide vertical y horizontalmente con el centro de la superficie de backscattering del blanco de prueba. Por lo tanto, si la antena rota en acimut con demasiada velocidad puede darse el caso que dichos centros nunca coincidan en ninguno de los pulsos emitidos. Es por ello que, a los fines de minimizar el error de medición de la constante de radar, es necesario maximizar la precisión de apuntamiento en acimut.

En general mientras mayor es el número de pulsos emitidos menor es la velocidad de rotación de la antena y, por consiguiente, menor el paso angular entre pulso y pulso. El paso o resolución angular en acimut debe ser menor que el diámetro de la esfera de calibración. Si se fija en 10% el error de apuntamiento máximo tolerable en acimut, el paso angular debería ser inferior al 10% del diámetro total del blanco de prueba. Para el caso de la esfera de 46 cm el número pulsos a emitir sería de 738, lo que daría un paso angular de 5,6 cm. En el caso de la esfera de 16 cm el número de pulsos a emitir sería de 2500 con una resolución angular de 1,6 cm.

Una cantidad tan elevada de pulsos por barrido tiene dos problemas asociados. El primero de estos es la excesiva duración de la estrategia de calibración. Si se configuran 2500 pulsos se tendría

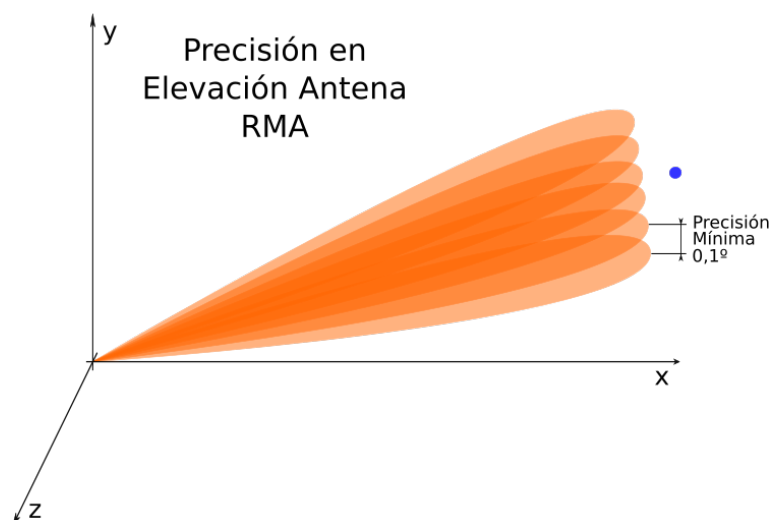


Figura 4.17: Representación de la precisión de apuntamiento vertical de la antena del RMA1.

un tiempo total de barrido de 360 segundos (6 minutos). Esta duración es inviable si se toma como referencia la autonomía de un UAV y la necesidad de contar con al menos 10 barridos a distinta elevación. Un problema similar se presenta si se configuran 768 pulsos para al menos 10 barridos. El segundo problema está vinculado a una limitación de funcionamiento del RMA. Las rutinas de validación de estrategias del radar limitan los agrupamientos de pulsos factibles de ser utilizados a los agrupamientos soportados por los distintos tipos de procesamientos implementados en el procesador de datos del radar (ver apartado 3.3.4.2). Actualmente el instrumento no cuenta con ningún tipo de procesamiento que soporte un número tan grande de pulsos³.

El máximo número de pulsos soportado por los distintos tipos de procesamientos implementados en el RMA es de 128 y será, por lo tanto, el número de pulsos a utilizar. Esto implica un paso angular equivalente de 32,1 cm, adecuado para la esfera de 46 cm pero muy pobre para la de 16 cm.

La elaboración de las estrategias implica un compromiso entre el error de apuntamiento deseado y la duración total de las mismas. Se resumen a continuación las dos estrategias diagramadas para la prueba. En el ANEXO A: 'Calibración Electrónica' se describen las mismas en detalle especificando número de pulsos para cada elevación, precisión de desplazamiento acimutal en función de dicho número, duraciones parciales y total.

- **Estrategia 5900:** cuenta con 23 barridos, todos conformados con grupos únicos de 128 pulsos. Tiene una duración teórica de 7 minutos⁴
- **Estrategia 5901:** cuenta con 23 barridos conformados con grupos únicos de pulsos de distinto número. El número de pulsos se reduce en las elevaciones extremas (margen inferior y superior) y se aumenta en las elevaciones centrales alrededor de la posición de los blancos de prueba.

Adicionalmente, una mejor resolución angular de rotación en acimut permite caracterizar de forma más precisa el lóbulo de radiación de la antena. La Figura 4.18 ilustra la precisión de apuntamiento horizontal de la antena del RMA.

³Esta limitación fue reportada al fabricante y se le solicitó la implementación de un mecanismo que permita anular el procesamiento interno del radar.

⁴El tiempo teórico de la estrategia no incluye los tiempos necesarios para los cambios de elevación y establecimiento de velocidad de rotación acimutal.

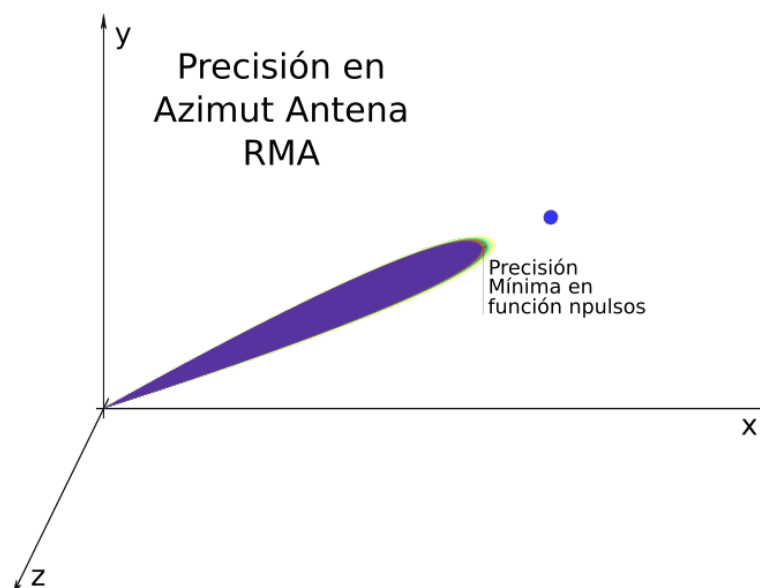


Figura 4.18: Representación de la precisión de apuntamiento horizontal de la antena del RMA.

4.4.7 Pruebas Experimentales

En este apartado se describen los detalles particulares de las pruebas de calibración realizadas. Se llevaron a cabo 3 pruebas experimentales, en las cuales se utilizaron globos cautivos como medio de sustentación para las dos primeras y un dron en la tercera.

La primer prueba fue un ensayo preliminar que sirvió principalmente para corregir procedimientos, detalles de logística y adecuar las rutinas de software. La segunda prueba de calibración pudo concretarse exitosamente y arrojó resultados positivos. Los detalles específicos y resultados de las mismas se describen en los apartados 4.4.7.1 y 4.4.7.2.

La tercer prueba de calibración se llevó a cabo en colaboración con el Laboratorio de Computación de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Este laboratorio es el propietario del dron presentado en la sección 4.4.2 y desarrolla parte del software de operación del mismo. La realización de la prueba requirió numerosos ensayos preliminares donde se evaluaron y ajustaron muchos aspectos. Entre estos podemos destacar:

- Diseño del sistema de acople blanco/dron.
- Pruebas de evaluación de la estabilidad del dron con y sin carga para distintas intensidades de viento y altitudes.
- Pruebas de balanceo del blanco a distancias variables del dron.
- Pruebas de despegue y aterrizaje.
- Geoposicionamiento.
- Altitud máxima.
- Durabilidad de la batería con y sin carga.
- Software de control automático y manual.
- Rango de alcance de comunicación y simulación de escenarios de pérdida de comunicación.

Lamentablemente las condiciones atmosféricas presentes al momento de la realización de la prueba no fueron las adecuadas. Todo la zona del sitio de calibración se vio afectado con neblina y no se pudieron sacar conclusiones de la misma. Se propone como trabajo futuro la repetición de esta prueba.

4.4.7.1 1º Prueba de Calibración: Ensayo Preliminar

El día 15 de enero de 2018 se realizó el primer ensayo en vistas de la calibración electrónica absoluta del RMA1. Las Figuras 4.19 y 4.20 son registros fotográficos tomados el día de la prueba. En estas se puede apreciar el blanco de calibración, los globos comerciales utilizados para la sustentación y el sitio de prueba.



(a) Detalle del blanco de calibración y medio de sustentación en detalle. (b) Blanco de calibración en ascenso, ubicado sobre el sitio de prueba.

Figura 4.19: Sitio de prueba, blanco de calibración y medio de sustentación.

Elementos Utilizados

- Esfera Reflectante: Diámetro 46 cm / Peso 350 g.
- Tensores: 4 carretes de 150 m x 0.6 mm; Peso: 70 g (sin carretel).
- Tensor Central: 1 carretel de 150 m x 0.6 mm: 70 g (sin carretel).
- Globos: globos comerciales; Peso: 100 g.
- Gas: $1m^3$ de Helio; Empuje: 1000 g (aprox.).
- Empuje Aproximado: 1000 g.
- Carga Total Aproximada: 850 g.

Fecha, Hora y Duración

- Fecha y Hora de Inicio: 15/01/2018 06:28 h.
- Fecha y Hora de Fin: 15/01/2018 08:52 h .
- Duración: 1 hora 45 minutos.
- La hora de inicio y fin se toman de los datos registrados con la estrategia de calibración.

Datos recopilados

Se registraron 349 barridos, correspondientes a 15 ciclos completos de estrategia.



Figura 4.20: Sitio de ensayo experimental con blanco de prueba en ascenso controlado.

Observaciones y Conclusiones

La prueba tuvo un balance muy positivo ya que se pudieron sacar conclusiones sobre diversos detalles a corregir en la siguiente prueba. A continuación se enumeran alguno de estos aspectos:

Sitio de Prueba: se hizo un reconocimiento del sitio y se tomó nota de ciertos obstáculos a evitar, en particular de una senda peatonal.

Medio de Elevación: para esta prueba se utilizó un tubo de $1m^3$ de Helio y globos comerciales de látex de 15 pulgadas.

A pesar que se usaron los globos comerciales, aptos para Helio, más grandes que se encontraron en el mercado, la prueba implicó inflar una cantidad significativa de los mismos para poder contener el m^3 de Helio disponible. La conclusión de esta tarea demandó un tiempo muy prolongado y resultó ser un procedimiento muy poco práctico, convirtiéndose en un punto crítico a resolver. Para solucionar esta problemática se contactaron a las autoridades del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) a los fines de solicitar la provisión de globos sondas, elementos utilizados para el perfilamiento vertical de la atmósfera de gran capacidad de carga. Las gestiones resultaron positivas y rápidamente se pudieron conseguir los globos necesarios para efectuar la segunda prueba.

Tensores: se desplegó el sistema de tensores diseñado. Se tomó nota y corrigió el sistema de despliegue y retracción de los tensores en el ascenso y descenso de la carga.

Estrategia: se probó la estrategia 5900. Durante el proceso de carga se generó un error en la validación de la misma, lo que obligó a cambiar el PRP de las elevaciones de 400 a 500 μs .

4.4.7.2 2º Prueba de Calibración

Las Figuras 4.21 y 4.22 son registros fotográficos tomados el día de la prueba. En estas se puede apreciar el blanco de calibración y medio de sustentación utilizados, la zona de prueba, las condiciones meteorológicas óptimas (cielo despejado), entre otros aspectos, para distintos momentos de la prueba experimental.

Elementos Utilizados

- Esfera Reflectante: Diámetro 46 cm / Peso 350 g.



Figura 4.21: Blanco de calibración con medio de elevación y parte del equipo de operación en sitio.



Figura 4.22: (Izq) Blanco de calibración con medio de sustentación en preparación. (Der) Blanco de calibración ubicado en el sitio de observación.

- Tensores: 4 carretes de 150 m x 0.6 mm; Peso: 70 g (sin carretel).
- Tensor Central: 1 carretel de 150 m x 0.6 mm: 70 g (sin carretel).
- Globos: 2 globos para radiosondeo; Peso: 350g c/u.
- Gas: 1,8 m³ de Helio; Empuje: 1800 g (aprox.).
- Empuje Aproximado: 1800 g.
- Carga Total Aproximada: 1400 g.

Fecha, Hora y Duración

- Fecha y Hora de Inicio: 16/01/2018 - 07:04 h.
- Fecha y Hora de Fin: 16/01/2018 - 08:49 h.
- Duración: 1 hora 45 minutos.
- La hora de inicio y fin se toman de los datos registrados.

Condiciones Climáticas

Las condiciones climática era óptimas, el cielo estaba despejado y la intensidad de viento era de 6 km/h aproximadamente. Las Figuras 4.23 y 4.24 muestran el estado de las variables de temperatura, presión, intensidad y dirección del viento registradas por la Estación Meteorológica Automática (EMA) del Laboratorio de Hidráulica de la FCEfyN de la UNC. Dicha estación se encuentra ubicada a 50 m de la base de la torre del RMA1.

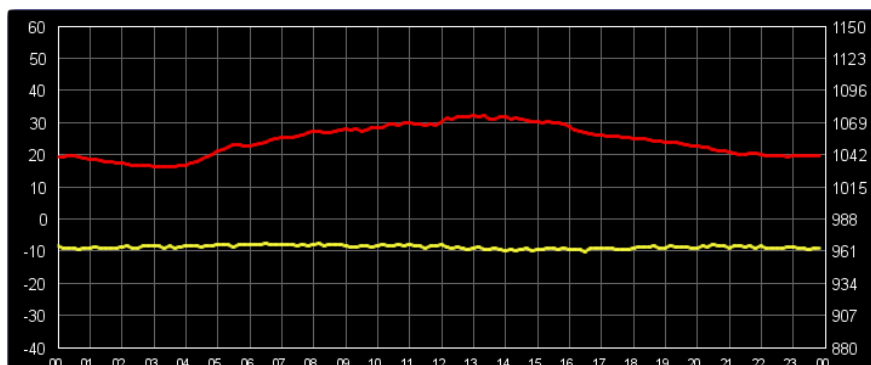


Figura 4.23: Se observa en rojo la temperatura y en amarillo la presión atmosférica registradas por la EMA del LH-FCEfyN-UNC el día 16/1/2018.

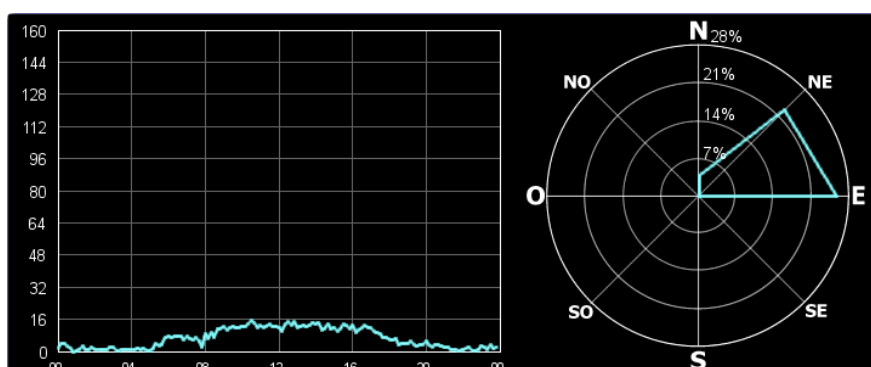


Figura 4.24: (Izq) Intensidad del viento. (Der) Dirección del viento. Ambas gráficas se corresponden a datos registradas por la EMA del LH-FCEfyN-UNC el día 16/1/2018.

Coordenadas y Elevación del Blanco en Sitio

- Lat = -31,428864.
- Lon = -64,172575.
- Elevación: 130 m.
- Distancia al Radar: 2300 m.

Los datos son aproximados ya que fueron extraídos de mediciones en tierra. No fue factible incorporar en esta instancia un sistema de geoposicionamiento en el blanco de calibración.

Datos recopilados

Se registraron 253 barridos, correspondientes a 11 ciclos completos de estrategia.

Parámetros de Operación del Radar

A los fines de chequear la calidad de las mediciones realizadas durante la prueba de calibración se realizó la captura de varios registros telemétricos de los subsistemas del radar. La Figura 4.25 y

4.26 muestran, respectivamente, la variación de la Potencia Pico de los Canales H y V en función del tiempo. Ambas gráficas muestran las corrientes de pico para dos canales de recepción distintos de la misma polarización (uno atenuado y otro regular).

En la Figura 4.25 se puede apreciar como, luego del período de inicialización (20' aproximadamente) las curvas de ambos canales se regularizan y estabilizan. Sin embargo, al observar la Figura 4.25 de la polarización vertical se ve una extensión de la inestabilidad en el comportamiento de los canales regulares abarcando a parte de los datos tomados en la prueba. Esto implica que buena parte de los datos del canal vertical deban ser descartados. Tampoco podrá calcularse con estos datos el sesgo entre ambas polarizaciones.

La Figura 4.27 muestra el corrimiento en frecuencia en banda base del pulso transmitido, registrado tanto para la polarización horizontal como vertical. Tal como puede apreciarse en la misma, el corrimiento en banda base para ambas polarizaciones es despreciable.

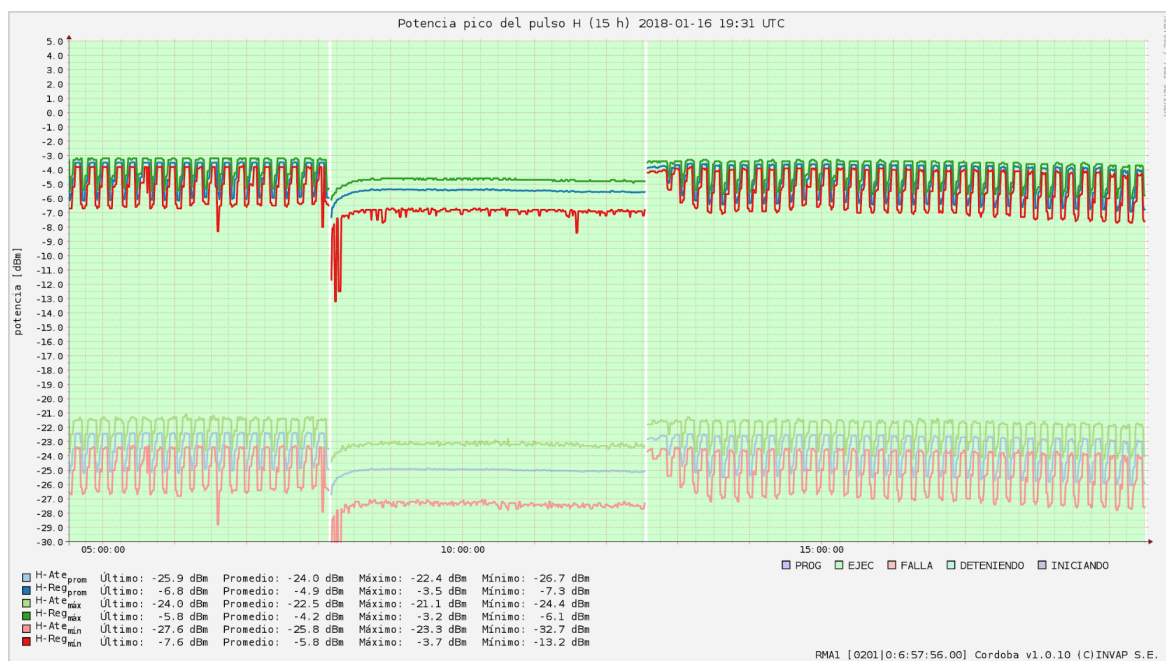


Figura 4.25: Variación de la Potencia Pico del Canal H en función del tiempo. Los datos correspondientes a la prueba de calibración se encuentran entre las dos franjas blancas verticales.

4.4.7.3 Resultados

Las Figuras 4.28 y 4.29 muestran el PPI, recortado al sector noreste de la Ciudad de Córdoba, resultante de la prueba de calibración para las variables Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} con una elevación de $1,09^\circ$. En el procesamiento de la primera ningún filtro fue aplicado, mientras que en la segunda se utilizó un filtro de umbral de ρ_{hv} .

Determinación de Constante de Radar del RMA1

La esfera de calibración se ubicó a 2300,64 m de distancia del radar. La reflectividad teórica calcula fue de 51,2494247807 [dBZ].

La máxima potencia normalizada medida fue de 7,515205 y se encontró en la celda N° 20, Acimut $52,07519^\circ$ y Elevación $1,098^\circ$ del radar.

El Z obtenido al utilizar dicha potencia y la constante de radar preconfigurada en el RMA1 ($1,1 \cdot 10^{15}$) fue de 50,8136978818 [dBZ]

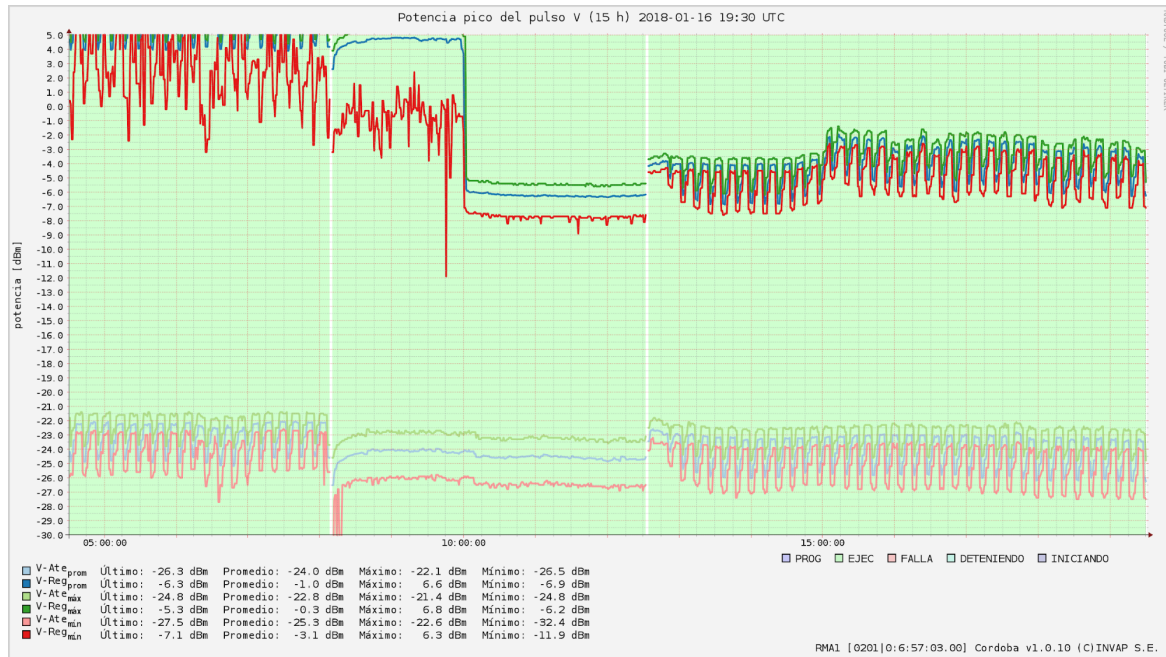


Figura 4.26: Variación de la Potencia Pico del Canal V en función del tiempo. Los datos correspondientes a la prueba de calibración se encuentran entre las dos franjas blancas verticales.

Utilizando los datos anteriores se calculó la nueva constante de radar, la cual tiene un valor de $0,994992930962 \cdot 10^{15}$

Errores de Apuntamiento en Acimut, Elevación y Rango

a) Error de Apuntamiento en Acimut

Se tomaron como referencia los siguientes blancos fijos:

- Antena de Canal 8 (Lat:-31,459866 / Lon:-64,202130)
- Torre de la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático y Catástrofes de la Prov. de Córdoba (Ex Torre Telecom) (Lat:-31,433858 / Lon:-64,174997).
- Antena Comunicación (Lat:-31,419647 / Lon:-64,196070).

El error promedio de apuntamiento en acimut calculado, utilizando los 11 barridos de la elevación de $0,7^\circ$ generados en la prueba de calibración, fue de $1,13^\circ$.

b) Error de Apuntamiento en Elevación y Rango.

Estos errores no pudieron ser calculados debido a la falta de precisión en la posición y elevación exacta de la esfera.

Caracterización del Lóbulo Principal de la Antena en Acimut

Las Figuras 4.30 y 4.31 representan el patrón de radiación de la antena en acimut reconstruido utilizando los datos recopilados durante la prueba. Se grafica la potencia de la celda N° 20 para el conjunto de acimuts comprendidos entre $49,5^\circ$ y $53,5^\circ$. Para la generación de la Figura 4.30 se utilizó una escala lineal, mientras que en la Figura 4.31 los datos son representados mediante una escala logarítmica.

Perfil de Potencia en Función del Rango

La Figura 4.32 muestra el perfil de Z en función del rango, utilizando el acimut $52,075^\circ$ y elevación $1,098^\circ$. Esta puede ser considerada con una buena aproximación de la salida del receptor para un pulso rectangular de entrada.

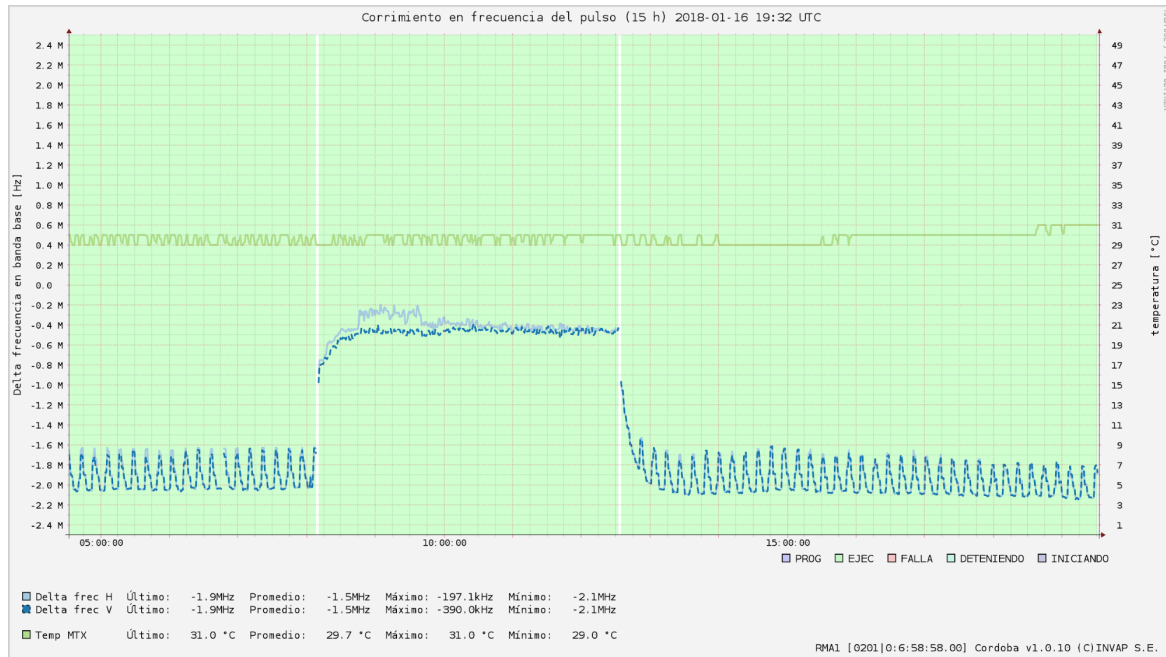


Figura 4.27: Corrimiento en Frecuencia del Pulso en función del tiempo. Los datos correspondientes a la prueba de calibración se encuentran entre las dos franjas blancas verticales.

Evaluación de Ganancia entre canales H y V (Z_{dr})

La evaluación no pudo ser realizada debido al desajuste en potencia de los canales H y V al momento de la realización de la prueba.

4.5 Calibración Electrónica Dinámica con Blancos Estáticos

En este apartado se propone un método de monitoreo y/o reajuste dinámico de la constante de calibración del radar.

El método intenta aprovechar la presencia de construcciones antropogénicas de elevada altura factibles de encontrar en las proximidades de los radares, como pueden ser edificios, antenas de comunicaciones, torres, entre otros.

Una vez realizada la calibración electrónica absoluta, se deben registrar los valores de referencia del Factor de Reflectividad Equivalente de ciertas construcciones seleccionadas.

Finalmente, realizando una comparación periódica de los distintos blancos de referencia, se pueden identificar posibles variaciones en la calibración y realizar los ajustes pertinentes en la constante de radar.

4.5.1 Procedimientos para el Procesamiento de Datos

4.5.1.1 Procedimiento de Inicialización

1. Ejecutar una estrategia configurada con una densidad elevada de pulsos para las distintas elevaciones (100 o más pulsos).
2. Elegir una elevación y almacenar un número estadísticamente significativo de barridos para la misma.
3. Graficar el mapa de clutter cercano del radar (utilizando ordenamiento por selección de acimut).

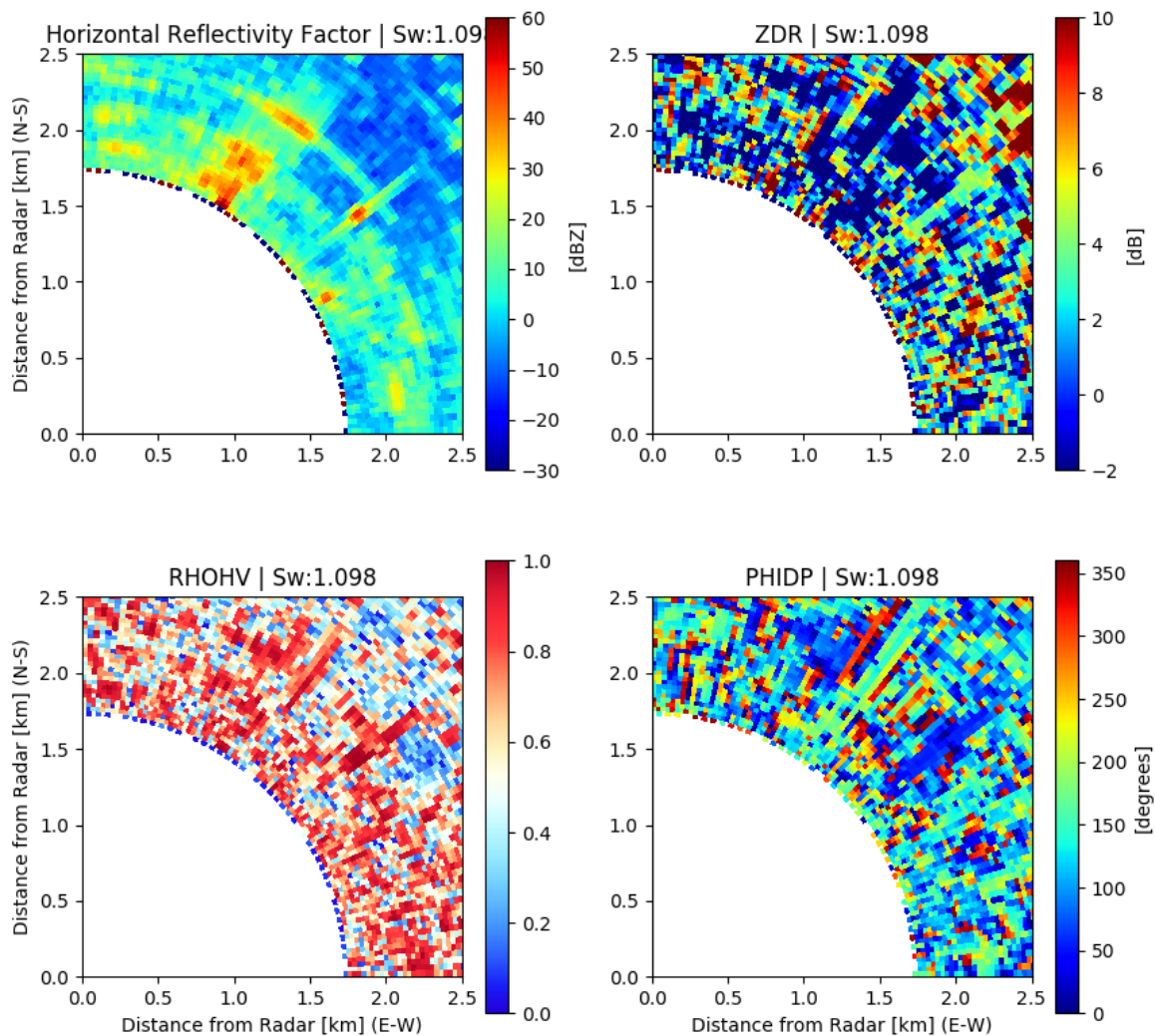


Figura 4.28: PPIs de las variables Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} con una elevación de $1,09^\circ$ sin filtros aplicados. Barrido registrado por el RMA1 el 16/1/2018 a las 10:34 h (UTC).

4. Identificar, caracterizar y seleccionar los blancos de alta reflectividad factibles de ser utilizados, mediante GoogleEarth u otro Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en Inglés "Geographic Information System").
5. Determinar y almacenar el máximo valor de potencia normalizada para cada blanco y barrido procesado.
6. Calcular la media de los valores almacenados en las distintas elevaciones para cada blanco seleccionado.
7. Calcular Z para cada blanco utilizando la constante de radar obtenida en la calibración electrónica absoluta y la potencia máxima media resultante del punto anterior. Esta es la nueva Z teórica.
8. Guardar en un archivo los valores obtenidos en el punto anterior.

4.5.1.2 Procedimiento de Calibración Dinámica

1. Generar y almacenar un nuevo conjunto de datos de radar utilizando la misma estrategia empleada para registrar los valores de referencia usados en el procedimiento de iniciación.
2. Determinar y almacenar el máximo valor de potencia normalizada para cada blanco y barrido

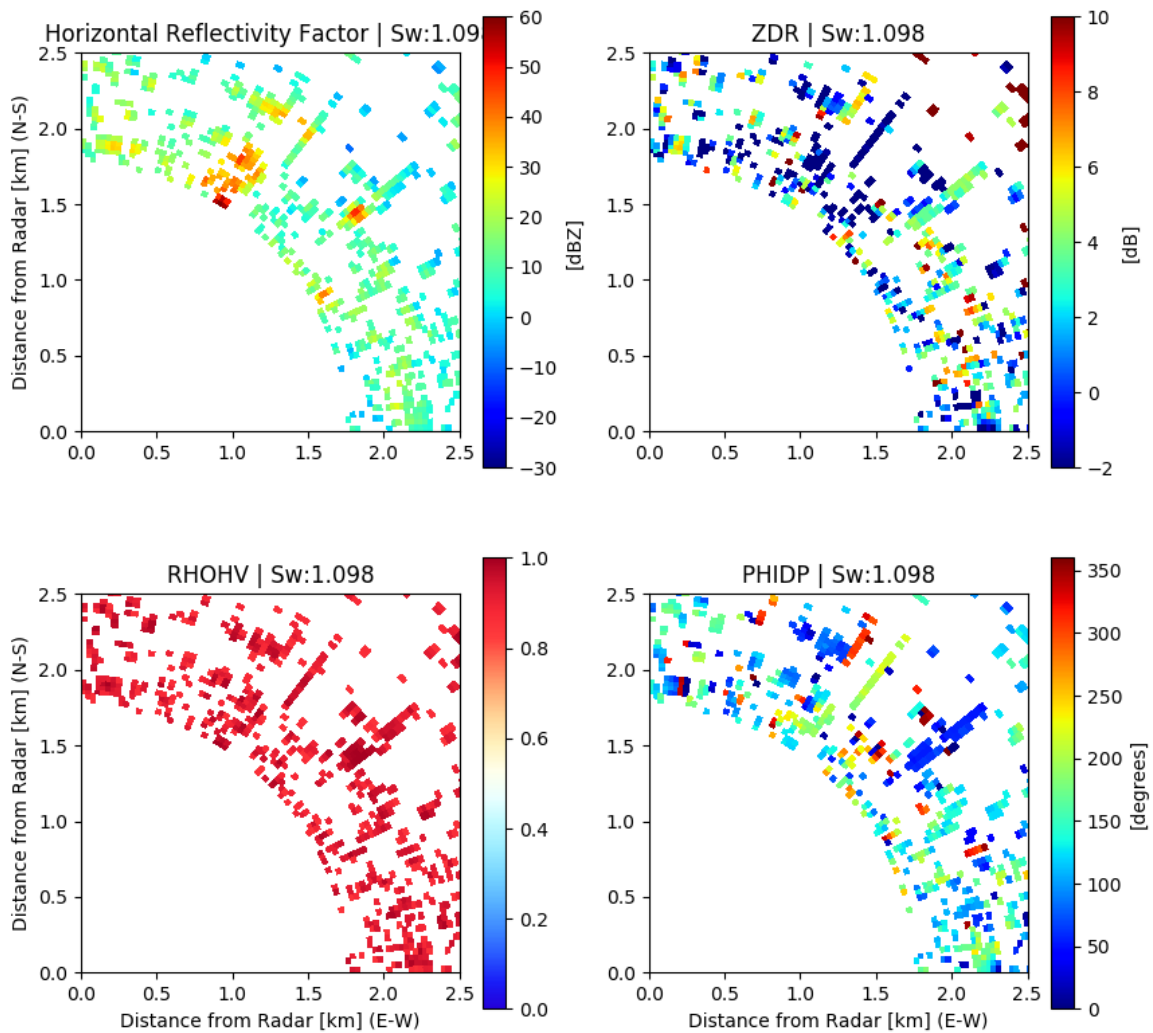


Figura 4.29: PPIs de las variables Z_h , Z_{dr} , ρ_{hv} y ϕ_{dp} con una elevación de $1,09^\circ$. Se han filtrado todas las celdas con valores de ρ_{hv} menores a 0,85. Se aprecia en el centro de la imagen, la reflectividad generada por la esfera reflectante. Barrido registrado por el RMA1 el 16/1/2018 a las 10:34 h (UTC).

procesado.

3. Calcular la media de los valores almacenados en las distintas elevaciones para cada blanco seleccionado.
4. Calcular la nueva constante de radar para cada uno de los blancos utilizando los valores de referencia de Z almacenados y los valores de la potencia máxima media del punto anterior.
5. La nueva constante de radar se obtiene de la media de los resultados del punto anterior.

4.5.2 Detección de Blancos Estáticos de Alta Reflectividad

Las condiciones climáticas que regían el día de las mediciones eran óptimas (aire claro sobre la Ciudad de Córdoba) por lo que se supone que todos los ecos registrados pertenecen a clutter de terreno o construcciones antropogénicas. De la superposición del mapa de clutter con imágenes satelitales, se comprueba que efectivamente las celdas de alta reflectividad coinciden con edificaciones de elevada altura o con regiones cuya altitud de terreno se encuentra sobre el nivel de los 440 m o elevaciones superiores.

La Figura 4.33 muestra una imagen satelital de la Ciudad de Córdoba superpuesto al mapa de

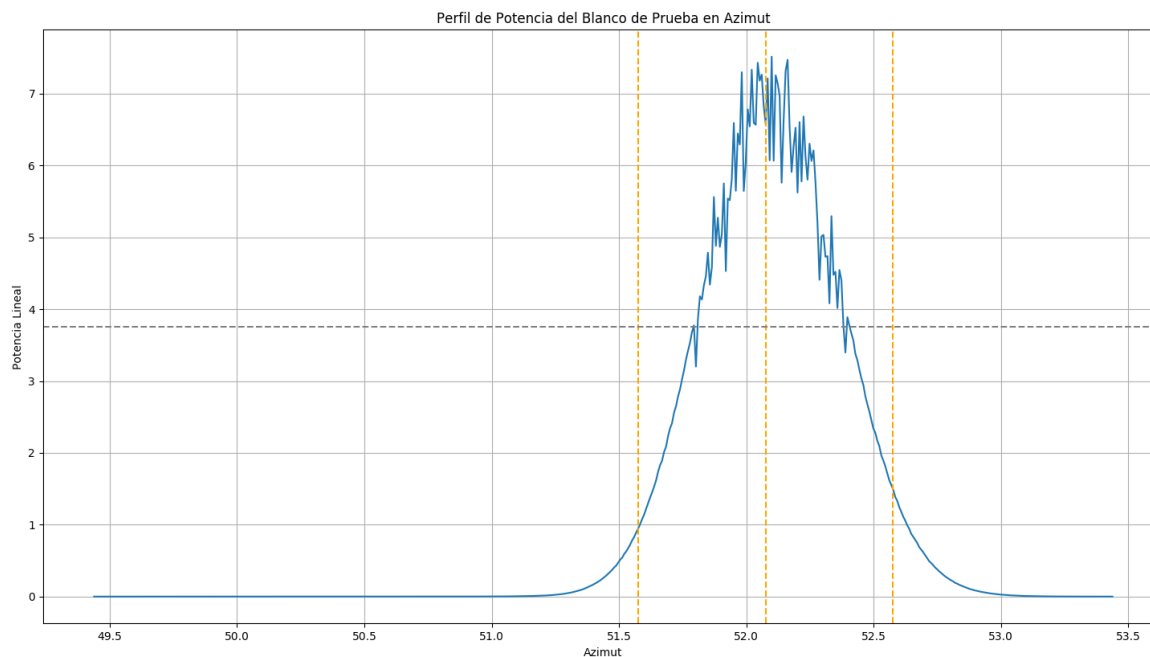


Figura 4.30: Perfil de potencia en acimut del blanco de calibración para la celda número 20 y elevación $1,1^\circ$ Escala Lineal.

clutter del RMA1. En esta se han marcado con un círculo azul y una leyenda los blancos de alta reflectividad ubicados en las cercanías del RMA1. A continuación se listan alguno de estos puntos con sus respectivas coordenadas geográficas:

- Faro del Bicentenario (Lat:-31,428478° / Lon:-64,182029°).
- Antena de Canal 8 (Lat:-31,459866° / Lon:-64,202130°).
- Molinos Minetti (Lat:-31,448137° / Lon:-64,218428°).
- Torre de la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático y Catástrofes de la Prov. de Córdoba (Ex Torre Telecom) (Lat:-31,433858° / Lon:-64,174997°).
- Antenas EPEC (Lat:-31,458048° / Lon:-64,169447°).
- Antena Comunicación (Lat:-31,419647° / Lon:-64,196070°).

Para la selección de los blancos definitivos se establecen una serie de criterios a seguir:

- Los blancos deben ser preferentemente estructuras angostas metálicas, idealmente torres o antenas reticuladas de telecomunicaciones.
- Tienen que encontrarse a la menor distancia posible del radar.
- Deben tener altura suficiente para ser medidos a elevaciones de $0,7^\circ$ o superiores.
- Ser estructuras definitivas. No se deberían seleccionar estructuras en etapa de construcción.

Aplicando estos criterios de selección, se analizan los distintos blancos preseleccionados y se eligen los definitivos:

- Molinos Minetti (Lat:-31,448137° / Lon:-64,218428°): es una edificación extremadamente ancha. Las partes más altas de la estructura, que coinciden con las celdas de máxima reflectividad, están constituidas por una serie de 6 silos contiguos. Se descarta.
- Faro del Bicentenario (Lat:-31,428478° / Lon:-64,182029°): al momento de la medición la edificación estaba adornada con luces y motivos navideños. Se descarta.
- Antenas EPEC (Lat:-31,458048° / Lon:-64,169447°): son dos antenas metálicas reticuladas. Si bien están dentro de un radio adecuado, tienen el problema de encontrarse muy juntas, el radar no alcanza a discernir una de otra. Se descarta.

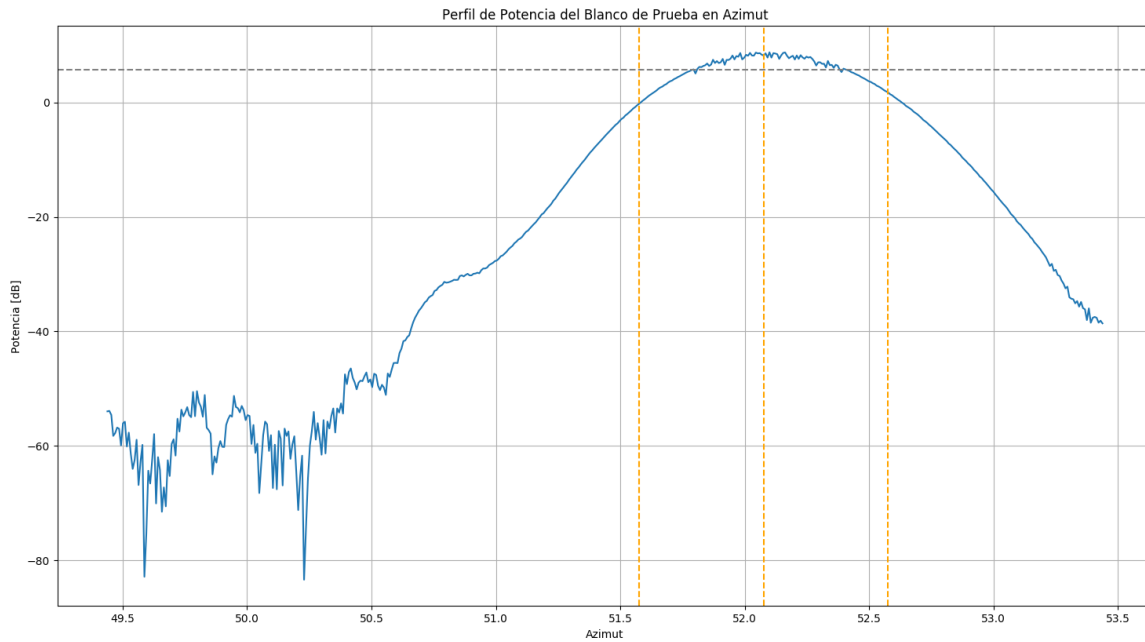


Figura 4.31: Perfil de potencia en acimut del blanco de calibración para la celda número 20 y elevación 1,1°. Escala Logarítmica.

- Antena de Canal 8 (Lat:-31,459866° / Lon:-64,202130°): antena metálica reticulada ideal para el cálculo.
- Torre de la Secretaría de Gestión de Riesgo Climático y Catástrofes de la Prov. de Córdoba (Ex Torre Telecom) (Lat:-31,433858° / Lon:-64,174997°): es una torre de hormigón de 110 m de alto, se encuentra en cercanía del radar. Es apto para ser utilizado.
- Antena Comunicación (Lat:-31,419647° / Lon:-64,196070°): antena metálica reticulada ideal para el cálculo.

4.5.3 Verificación de Metodología

A los fines de probar la metodología y los algoritmos implementados se realizó el siguiente procedimiento:

- Se utiliza el mismo conjunto de datos empleado en el proceso de inicialización
- Se modifica la constante de radar simulando un desajuste en el sistema.
- Se calcula la nueva constante y se compara con la almacenada.

La verificación de la metodología fue exitosa. La nueva constante calculada fue idéntica a la almacenada, lo que era de esperar al haberse utilizado el mismo conjunto de datos. Si bien este resultado es prometedor, es necesario realizar un análisis estadístico exhaustivo, durante un período de observación significativo, con objeto de comparar resultados y determinar las bondades del método a los fines del ajuste dinámico de la constante de radar.

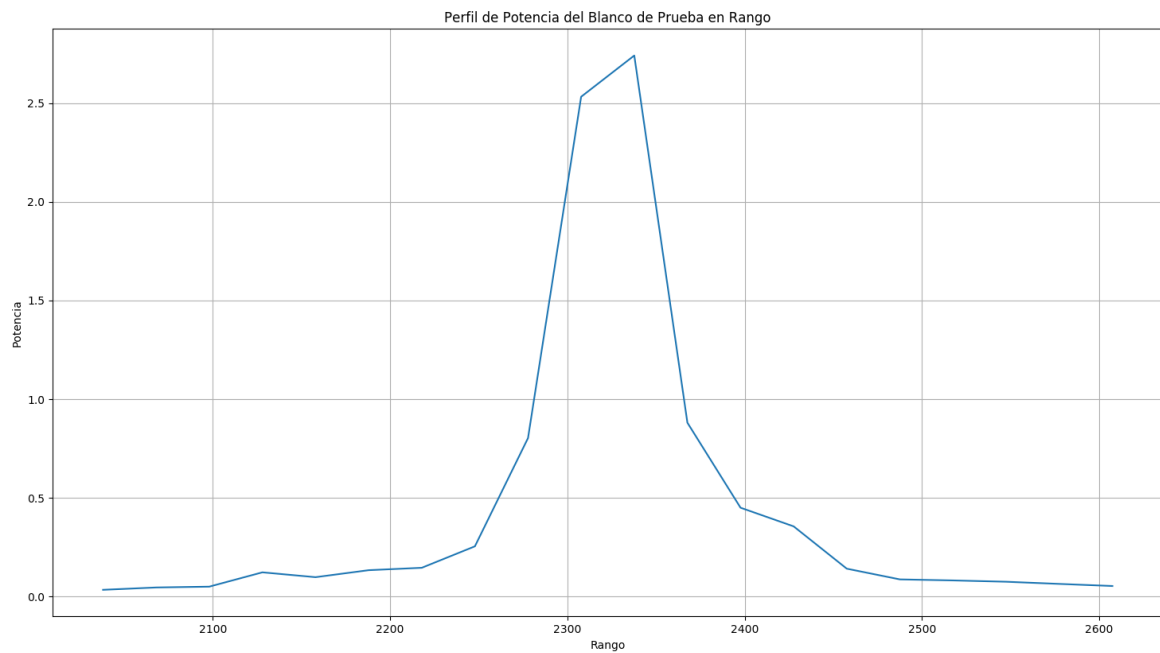


Figura 4.32: Perfil de potencia del blanco de calibración en rango.

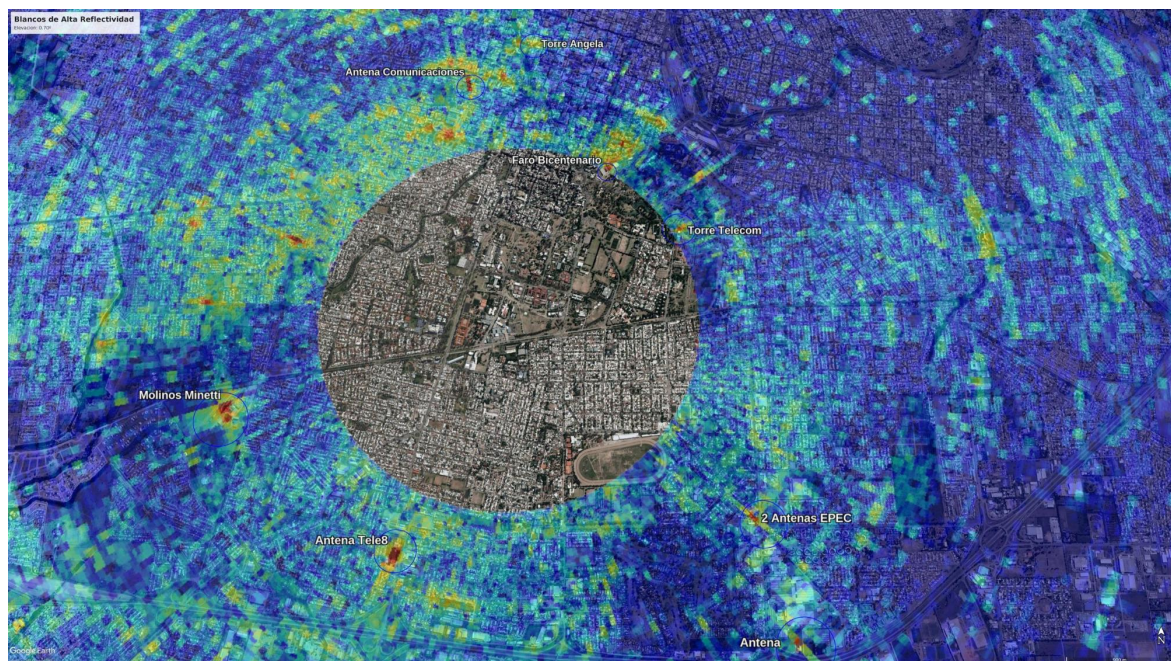


Figura 4.33: Mapa de Clutter del RMA1 superpuesto a una imagen satelital de la Ciudad de Córdoba. Se marcan los blancos de alta reflectividad con un círculo azul y una leyenda identificatoria.



5. Conclusiones y Trabajo Futuro

5.1 Conclusiones

Se ha desarrollado exitosamente una biblioteca de procesamiento de datos de Nivel 1 de Radares Meteorológicos. Se listan a continuación varios aspectos destacables de la misma:

- Se han implementado los módulos correspondientes para dar soporte a datos del Radar Meteorológico Argentino (RMA).
- Los módulos y herramientas implementadas han sido validadas satisfactoriamente para distintos casos de uso utilizando datos del Radar Meteorológico Argentino 1 (RMA-1).
- Se han desarrollado distintos modos de carga, tipos de procesamiento, filtros, visualizadores y almacenamiento de datos.
- Se han implementado estimadores y algoritmos de cálculo para la generación de 11 productos de Nivel 1 y 2.
- La paralelización de parte del procesamiento optimizó significativamente la performance de la aplicación.
- Se detectaron una serie de posibles errores sobre ciertos aspectos de funcionamiento del RMA a ser discutidas con el fabricante.

Desde el punto de vista del aprendizaje, se han reafirmado conceptos teóricos y profundizado conocimientos en el área del procesamiento de señales de radar.

Se completó exitosamente una prueba de calibración electrónica absoluta del RMA-1. El software de calibración ha sido diseñado e implementado dentro de la estructura interna de la Biblioteca de Procesamiento de Datos N1. La constante de radar es calculada automáticamente a partir de los datos adquiridos en una prueba de calibración.

Se calculó el error de apuntamiento y se caracterizó el lóbulo de radiación principal de la antena del radar en acimut.

Finalmente, se presentó un método de calibración dinámica de radar, a partir de una calibración absoluta y blancos fijos de alta reflectividad. El módulo de calibración dinámica ha sido acoplado a la Biblioteca de Procesamiento de Datos L1. Los resultados alcanzados permiten presumir que la técnica podría ser utilizada para calibrar periódicamente un radar meteorológico. Sin embargo, un estudio estadístico es necesario para obtener conclusiones más precisas sobre la utilidad de esta técnica.

5.2 Trabajo Futuro

El software de procesamiento de datos L1 ha sido desarrollado en forma modular con el objetivo de optimizar el procesamiento, facilitar el mantenimiento del código y, al mismo tiempo, permitir la incorporación de nuevas funcionalidades, filtros y tipos de procesamiento con el menor esfuerzo posible.

Solo a fines enumerativos, podemos mencionar una serie de funcionalidades que podrían ser desarrolladas a futuro, como parte de trabajos finales de grado, especialización o maestría:

- Filtrado de Clutter: GMAP.
- Paralelización en el Cálculo de Productos N2 con GPGPU.
- Implementación del producto Doppler con FFT.
- Implementación de procesamiento DualPRF.
- Desarrollo de correctores del campo ϕ_{dp} .
- Generación de producto K_{dp} .

En lo que respecta al módulo de calibración absoluta y dinámica se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Repetición de la prueba de calibración con drone y comparación de resultados.
- Desarrollo de algoritmo de identificación automática del blanco de prueba utilizando la firma típica de un blanco metálico esférico.
- Desarrollo de los módulos estadísticos para la comparación dinámica de las mediciones de radar.



A. Calibración Electrónica

Este anexo contiene información complementaria al capítulo 4 relacionada a las pruebas de calibración absoluta realizadas para el Radar Meteorológico Argentino 1 (RMA1).

nPulsos	Corrimiento Az [m]	Duración (s)
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
Total		423,936

Tabla A.1: Estrategia 5900: se especifica duración y precisión de desplazamiento acimutal para los distintos barridos utilizados. Parámetros utilizados: PRP = 400 μ s.


nPulsos	Corrimiento Az [m]	Duración (s)
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
768	0,053	110,592
768	0,053	110,592
768	0,053	110,592
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
128	0,321	18,432
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
40	1,027	5,76
Total		586,368

Tabla A.2: Estrategia 5901: se especifica duración y precisión de desplazamiento acimutal para los distintos barridos utilizados. Parámetros utilizados: PRP = 400 μ s.

Elev.(°)	Elev.(rad)	Altura Haz sobre 0°	Altitud Haz (s.n.m.)	Altitud Borde Sup. Lóbulo 3dB	Altitud Borde Inf. Lóbulo 3dB	Referencia
0,1	0,00175	4,106	488,106	508,637	467,574	No usado
0,2	0,00349	8,212	492,212	512,743	471,680	No usado
0,3	0,00524	12,318	496,318	516,849	475,786	No usado
0,4	0,00698	16,424	500,424	520,955	479,892	No usado
0,5	0,00873	20,530	504,530	525,061	483,998	No usado
0,6	0,01047	24,636	508,636	529,168	488,105	No usado
0,7	0,01222	28,743	512,743	533,274	492,211	Margen Inferior ¹
0,8	0,01396	32,849	516,849	537,381	496,318	Margen Inferior
0,9	0,01571	36,956	520,956	541,488	500,425	Margen Inferior
1	0,01745	41,063	525,063	545,595	504,532	Margen Inferior
1,1	0,01920	45,170	529,170	549,702	508,639	Margen Inferior
1,2	0,02094	49,278	533,278	553,809	512,746	Margen Inferior
1,3	0,02269	53,386	537,386	557,917	516,854	Margen Inferior
1,4	0,02443	57,494	541,494	562,025	520,962	Zona Medición ²
1,5	0,02618	61,602	545,602	566,134	525,071	Zona Medición
1,6	0,02793	65,711	549,711	570,243	529,180	Zona Medición
1,7	0,02967	69,821	553,821	574,352	533,289	Zona Medición
1,8	0,03142	73,930	557,930	578,462	537,399	Zona Medición
1,9	0,03316	78,040	562,040	582,572	541,509	Zona Medición
2	0,03491	82,151	566,151	586,683	545,620	Zona Medición
2,1	0,03665	86,262	570,262	590,794	549,731	Zona Medición
2,2	0,03840	90,374	574,374	594,905	553,842	Zona Medición
2,3	0,04014	94,486	578,486	599,018	557,955	Zona Medición
2,4	0,04189	98,599	582,599	603,130	562,067	Margen Superior ³
2,5	0,04363	102,712	586,712	607,244	566,181	Margen Superior
2,6	0,04538	106,826	590,826	611,358	570,295	Margen Superior
2,7	0,04712	110,941	594,941	615,473	574,410	Margen Superior
2,8	0,04887	115,056	599,056	619,588	578,525	Margen Superior
2,9	0,05061	119,173	603,173	623,704	582,641	Margen Superior
3	0,05236	123,289	607,289	627,821	586,758	No usado ⁴

Tabla A.3: Caracterización de las elevaciones y altitud teórica del lóbulo principal de la antena del RMA-1 referidos al sitio de prueba elegido.

Referencias: ¹ Elevación Inicial; ² La parte superior del lóbulo principal empieza a sentir la esfera metálica; ³ La parte inferior del lóbulo principal deja de sentir la esfera metálica; ⁴ La parte superior del lóbulo principal empieza a sentir el dron



B. Especificaciones Técnicas RMA

Este apéndice resume las características más relevantes de los principales subsistemas del Radar Meteorológico Argentino (RMA).

Antena

Propiedad	Valor
Tipo de Reflector	Parabólico con Iluminador centrado.
Diámetro	4,5m
Precisión de Apuntamiento	$\pm 0,1^\circ$
Rango de Movimiento en Elevación	-1 a 90°
Rotación en Azimut Continua	360° hasta 6 RPM
Frecuencia de Trabajo	5,45GHz a 5,82GHz
Ganancia de Antena	min: 45dBi @5,635GHz
HPBW	máx: 1° @5,635GHz
Nivel de Lóbulos Laterales	min: 25dB @5,635GHz
Nivel de Lóbulos Traseros	min: 25dB @5,635GHz
Tipo de Polarización	Lineal Doble, Horizontal y Vertical
Polarización Cruzada	min: -25dB @5,635GHz @HPBW
Polarización Cruzada Promedio	min: -30dB @5,635GHz
Potencia de RF Pico	máx: 350 kW
ROE	máx: 1.4
Apareo de Haz H y V	máx: $0,1^\circ$ @HPBW

Tabla B.1: Especificaciones Técnicas de la Antena del RMA1, elemento desarrollado por la empresa INVAP S.E.. Datos extraídos de INVAP S.E., 2015.

Transmisor

Especificación	Descripción	Observaciones
Tipo de Modulador	Estado Sólido	Modulador de interruptor IGBT, controlado por corriente.
Frecuencia	Rango de Operación de 5600 a 5650MHz	Ajustable desde 5450 a 5820MHz
Potencia de Salida RF	100 a 350KW pico a pico	Ajustable con alimentador de haz en HVPS
Ciclo de Trabajo	0,001 (0,1 %)	Ciclo de trabajo de pulso RF
Ancho de Pulso de Entrada (PW)	0,2 a 4,0 μ s	Continuamente Variable
PRF	250 a 5000Hz	Dentro de los límites del ciclo de trabajo del magnetrón.
Tensión de Entrada	208 V_{CA} 30, 50Hz, $\pm 5\%$	
Variación de Amplitud Pulso a Pulso	0,1 dB máximo	
Caída RF dentro del Pulso	0,5dB máximo en ancho máximo del pulso.	
Tiempo de Subida RF	100 ns (típico)	
Tiempo de Caída RF	125 ns (típico)	
Temperatura de Operación	-10 a +50°C (ambiente)	
Refrigeración	A aire	

Tabla B.2: Especificaciones Técnicas del Transmisor del RMA1. Datos extraídos de INVAP S.E., 2015.

Receptor Analógico

Especificación	Valores
Tipo	superheterodino de doble conversión
Sensibilidad (MDS)	-110 dBm @pulsos de 3 ms
Rango Dinámico	93 dB
Ancho de Banda	370 MHz (5450 MHz - 5820 MHz)
Ancho de Banda de FI	10MHz
Potencia Tolerable a la Entrada	34 dBm
Figura de Ruido	< 3.5 dB
Rechazo a la Frecuencia Imagen	80dB
Frecuencia Intermedia	70 MHz

Tabla B.3: Especificaciones Técnicas del Receptor Analógico del RMA1. Datos extraídos de INVAP S.E., 2015.

Especificaciones Técnicas Generales

Variable	Valores
Frecuencia de Operación	5450 a 5820 MHz
Ancho de Pulsos	0,4 a 3s
Resolución Máxima	60m @Pulsos de 0,4s
Frecuencia de Repetición de Pulsos	300 a 2000 Hz
Alcance Máximo No Ambiguo	480 km
Alcance Operacional Típico	240 km

Tabla B.4: Especificaciones Técnicas Generales del RMA1. Datos extraídos de INVAP S.E., 2015.



Referencias

- Doviak, Richard J y Dusan S Zrníc. *Doppler Radar & Weather Observations*. Academic Press, 1993.
- Scarchilli, G., E. Gorgucci, D. Giuli, L. Baldini, L. Facheris y E. Palmisano. «Weather Radar Calibration by Means of the Metallic Sphere and Multiparameter Radar Measurements». En: *Il Nuovo Cimento* 18.1 (1995), págs. 57-70.
- Bringi, VN y V Chandrasekar. *Polarimetric Doppler Weather Radar: principles and applications*. Cambridge University Press, 2001.
- Richards, Mark A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill, 2005.
- INVAP S.E. *Manuales Técnicos y de Operación del Radar Meteorológico Argentino*. 1.^a ed. 2015.
- Duthoit, Simon, Jorge L. Salazar, William Doyle, Antonio Segales, Brent Wolf, Caleb. Fulton y Phillip Chilson. «A New Approach for In-situ Antenna Characterization, Radome Inspection and Radar Calibration, Using an Unmanned Aircraft System (UAS)». En: ISBN: 978-1-4673-8823-8/17 (2017), págs. 669-674.
- Rauber, Robert M. y Stephen W. Nesbitt. *Radar Meteorology: A First Course*. John Wiley & Sons Ltd, 2018.
- National Weather Service. *Doppler Radar Tutorial*. 2019. URL: https://www.weather.gov/jetstream/doppler_intro.
- *Warning Decision Training Division: Radar and Applications Course*. 2019. URL: <https://training.weather.gov/wdtd/courses/rac/index.php>.
- MIT. *Introduction to Radar Systems: Target Radar Cross Section*. 2020. URL: <https://www.ll.mit.edu/>.
- Python Software Foundation. *Documentacion Oficial de Python*. 2020. URL: <https://docs.python.org/>.



Acrónimos

K_{dp} Fase Diferencial Específica. 27, 84

V_{rad} Velocidad Doppler. 28, 29

W_{rad} Ancho Espectral. 33

Z Factor de Reflectividad Equivalente. 51, 75, 76

Z_h Factor de Reflectividad Equivalente Horizontal. 15, 21–23, 34, 42, 61, 66

Z_v Factor de Reflectividad Equivalente Vertical. 21, 22, 34

Z_{dr} Factor de Reflectividad Diferencial. 22, 24

ϕ_{dp} Fase Diferencial. 26, 27, 84

ρ_{hv} Coeficiente de Correlación Co-Polar. 24, 27

ADC Analog Digital Converters (Conversores Analógicos-Digitales). 11

BUFR Binary Universal Form for the Representation of Meteorological Data (Formato Binario Universal para la Representación de Información Meteorológica). 12

DDC Digital Down Conversion. 11

DSD Drop Size Distribution (Distribución de Tamaño de Gotas). 21

EMA Estación Meteorológica Automática. 74

FAA Fuerza Aérea Argentina. 56

FCEfyN Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 70, 74

FI Frecuencia Intermedia. 10, 11, 32

FPGA Field-programmable Gate Array (Matriz Programable de Puertas Lógicas sobre el Terreno). 11

GIS Geographic Information System (Sistema de Información Geográfica). 78

GPGPU General Processing Graphic Processor Unit (Unidad de Procesamiento Gráfico de Propósito General). 12, 44

GPS Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global). 58

INVAP Investigaciones Aplicadas S.E.. 6, 39

IQ Señales en Fase y Cuadratura. 11

- N1** Datos o productos de Radar de Nivel 1. 6, 11, 32
- N2** Datos o productos de Radar de Nivel 2. 6
- NCAR** National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE.UU.). 10
- NetCDF** Network Common Data Form (Formato de Datos Comunes de Red). 12, 37, 48
- NEXRAD** Next Generation Radar Network (Red operativa de radares meteorológicos de EE.UU.). 13
- NSF** National Science Foundation (Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU.). 10
- PPI** Plan Position Indicator (Indicador de Posición Plano). 13–16, 22–27, 29, 31
- PPP** Pulse Pair Processing. 33, 35
- PRF** Pulse Repetition Frequency (Frecuencia de Repetición de Pulsos). 16, 59
- PRP** Pulse Repetition Period (Período de Repetición entre Pulsos). 16, 17, 39, 67, 72
- PW** Pulse Width (Ancho del Pulso). 17, 67
- RAID** Redundant Array of Independent Disks (Matriz Redundante de Discos Independientes). 12
- RCS** Radar Cross-section (Sección Transversal de Radar). 18, 51–54, 62
- RF** Radio Frecuencia. 10, 11
- RHI** Range Height Indicator (Indicador de Altura y Rango). 13, 15, 16
- RMA** Radar Meteorológico Argentino. 6, 9, 13, 37, 39–41, 44, 46, 47
- RMA-1** Radar Meteorológico Argentino 1. 7, 12, 21, 38–40, 42, 43, 45–49, 51, 54, 58, 83
- S-Pol** Polarimetric S Band Radar (Radar Polarimétrico Banda S). 10
- SiNaRaMe** Sistema Nacional de Radares Meteorológicos. 6
- SMN** Servicio Meteorológico Nacional. 72
- SNR** Signal to Noise Ratio (Relación Señal a Ruido). 17
- TDWR** Terminal Doppler Weather Radar. 9
- UAV** Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado). 57, 58, 69
- UNC** Universidad Nacional de Córdoba. 70, 74
- UPS** Uninterruptible Power Supply (Sistema de Alimentación Ininterrumpible). 10
- VPN** Virtual Private Network (Red Privada Virtual). 10
- WSR-88D** Weather Surveillance Radar-1988 Doppler (Radar Meteorológico de Vigilancia-88D). 9, 13