

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE FÍSICA**



**“Diseño de un Sistema de Alerta Temprana y estimación de intensidad de lluvia utilizando  
Radares de Banda X del Sistema LAWR de EL Salvador”.**

**TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:**

**ANGEL DE JESUS LEMUS REYES**

**MANUEL ULISES PACHECO REYES**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**

**LICENCIADO EN FÍSICA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2014**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**  
**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**  
**ESCUELA DE FÍSICA**



**“Diseño de un Sistema de Alerta Temprana y estimación de intensidad de lluvia utilizando  
Radares de Banda X del Sistema LAWR de EL Salvador”.**

**TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:**

**ANGEL DE JESUS LEMUS REYES**

**MANUEL ULISES PACHECO REYES**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**

**LICENCIADO EN FÍSICA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2014**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

**ESCUELA DE FÍSICA**

**“Diseño de un Sistema de Alerta Temprana y estimación de intensidad de lluvia utilizando  
Radares de Banda X del Sistema LAWR de EL Salvador”.**

**TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:**

**ANGEL DE JESUS LEMUS REYES**

**MANUEL ULISES PACHECO REYES**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**

**LICENCIADO EN FÍSICA**

**ASESOR INTERNO:**

**LIC. RAÚL ALVARENGA, UES**

**ASESORES EXTERNOS:**

**LIC. LORENA SORIANO, DGOA**

**MSC. LUIS GARCÍA, DGOA**

**CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2014**

**AUTORIDADES UNIVERSITARIAS**

RECTOR

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

SECRETARIA GENERAL

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

FISCAL GENERAL

**LIC. FRANCISCO CRUZ LETONA**

**DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA**

**MSC. MARTIN ENRIQUE GUERRA CACERES**

SECRETARIO

**LIC. CARLOS ANTONIO QUINTANILLA APARICIO**

DIRECTOR DE LA ESCUELA DE FÍSICA

**MSC. VICTOR LAUREANO CORTEZ LARA**

## **A G R A D E C I M I E N T O S**

Un especial agradecimiento en un aporte grande del Centro de Pronóstico Meteorológico, en especial al Licenciado Walter Alexander Flores quien brindo su experiencia meteorológica en el análisis de los tipos de lluvia involucrados en cada caso de estudio.

A los compañeros de Hidrología del MARN quienes brindaron de forma oportuna y precisa la información de la red telemétrica y otros insumos que se vieron involucrados para servir como parte de la iniciativa del análisis de datos.

Parte del desarrollo de este trabajo a quienes agradecemos de igual manera es a nuestros asesores quienes nos han orientado en todo momento en la realización de este proyecto que enmarca el último escalón hacia un futuro en donde sea partícipe en el mejoramiento del proceso de enseñanza y aprendizaje.

Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales el cual con su iniciativa de prevenir a la población de fenómenos naturales hizo la adquisición de radares meteorológicos los cuales son la base de esta investigación.

A Niels Einar Jensen del Instituto Hidráulico Danés como apoyo en la parte del desarrollo de la extracción y análisis de los datos.

A los licenciados Américo Mejía López y Marco Ayala docentes de la escuela de física quienes ayudaron en la programación de la automatización de los datos de reflectividad, además de aportar iniciativas para utilizar mejores programas para el análisis de datos.

Agradecemos principalmente a las personas que de cierta manera se vieron involucradas en el proceso de elaboración de esta investigación, a las que colaboraron en la toma de datos, muchísimas gracias.

## **DEDICATORIA**

Es mi humilde deseo como gesto de agradecimiento, dedicarle esta obra de Trabajo de Graduación plasmada en el presente Informe, en primera instancia a Dios todo poderoso que me ha dado sabiduría, fuerza, determinación e inteligencia para llegar a este punto de mi vida; a mi progenitora, la cual contribuyo incondicionalmente a la formación de mis valores y que con sus consejos ayudo a lograr las metas y objetivos propuestos, quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir, por sus buenos deseos de formar en mi una persona capaz de cumplir sus metas a pesar de las adversidades.

A mí amado abuelo Alvino Reyes que en la gloria de Dios este, que de igual manera por sus consejos he llegado a cumplir mis metas como promesa de superación de su linaje. A ti querida Mama Tere, que eres mi segunda madre ha sido fuente de motivación e inspiración en la lucha de seguir adelante les dedico este triunfo.

Como muestra de cariño y afecto incluyo a mi familia en esta dedicatoria, los cuales tuvieron que verse abandonados en algunos eventos familiares, en los cuales por estudiar no pude acompañarlos.

Al personal docente que me han acompañado durante el largo camino, brindándome siempre su orientación, su profesionalismo en la adquisición de conocimientos y afinando mi formación como estudiante universitario.

A la Universidad de El Salvador por ser un ente creador de muchos profesionales, además de ser la casa de mis estudios y regalarme tantos momentos inolvidables en cada año que curse en sus instalaciones y por ser la única que apuesta por el desarrollo científico de este país regalándonos a personas que no se rinden y buscan la excelencia académica como lo somos, nosotros los licenciados en Física

*Ángel de Jesús Lemus Reyes*

## **DEDICATORIA**

Al finalizar mi carrera profesional he alcanzado una de mis metas en la vida, por lo que quiero dedicar con cariño, respeto y mucha gratitud por el apoyo incondicional durante mi carrera a:

**DIOS:** por sus bendiciones para alcanzar este triunfo, por llenarme de fuerza y sabiduría a lo largo de este camino, por darme la inteligencia para lograr una de mis metas profesionales.

**A MIS PADRES:** José Manuel Pacheco y Luz de María Reyes por todo el amor brindado, porque creyeron en mí, y siempre estuvieron impulsándome durante todo el camino, porque crecí con sus valiosos ejemplos de superación y consejos.

**A MI FAMILIA:** a mis hermanos y demás familia por todo su apoyo moral y espiritual brindado, por siempre estar a mi lado apoyándome durante toda mi carrera, y lograr alcanzar esta meta.

**A MIS AMIGOS:** gracias por su comprensión y apoyo que día a día me brindaron, durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

**A MIS MAESTROS Y ASESORES:** por compartir todos sus conocimientos a lo largo de mi carrera y trabajo de investigación, por su paciencia y su tiempo por impulsar el desarrollo de mi formación profesional.

***Manuel Ulises Pacheco***

# Contenido

1	Fundamento Teórico .....	1
1.1	Fundamentos básicos de radares meteorológicos.....	1
1.1.1	Escalas de reflectividad.....	5
1.1.2	Longitud de onda del radar. ....	6
1.2	Sistema de radares meteorológicos de área local (LAWR).....	6
1.2.1	Rango y Precisión .....	7
1.2.2	Atenuación .....	9
1.2.3	Homogeneidad .....	10
1.3	Procesos meteorológicos .....	12
1.3.1	Procesos de creación de Nubes y precipitación .....	13
1.3.2	Tipos de precipitación.....	16
1.4	Pronóstico Meteorológico .....	17
1.5	Monitoreo Meteorológico .....	20
1.5.1	Satélites meteorológicos .....	20
1.5.2	Imágenes Satelitales Visibles.....	23
1.5.3	Imágenes Satelitales Infrarrojas .....	24
1.5.4	Imágenes Satelitales de Vapor de Agua.....	27
1.5.5	Sistema LAWR de El Salvador.....	28

1.5.6	Imágenes de radar del sistema LAWR de El Salvador .....	32
1.5.7	Reportes METAR .....	33
1.5.8	Estaciones Telemétricas.....	36
1.6	Sistema de Alerta Temprana (SAT).....	38
2	Metodología .....	40
2.1	Componentes del sistema LAWR .....	40
2.2	Método de Calibración.....	44
2.3	Método de Marshall-Palmer.....	47
2.3.1	Estimación de intensidad de lluvia utilizando la relación Z-R .....	48
2.4	Diseño de Sistema de Alerta Temprana .....	50
3	Resultados y Discusión.....	52
3.1	Automatización de datos P00.....	55
3.2	Cálculo de tasa de lluvia utilizando Marshall- Palmer.....	58
3.3	ESTUDIOS DE CASOS .....	61
3.3.1	CASO 1: 18 DE JULIO DE 2013.....	61
3.3.2	CASO 2: 29 DE JULIO DE 2013.....	66
3.3.3	CASO 3: 11 DE AGOSTO DE 2013.....	71
3.3.4	CASO 4: 15 DE AGOSTO DE 2013.....	75
3.3.5	CASO 5: 19 DE AGOSTO DE 2013.....	78
3.3.6	CASO 6: 30 AGOSTO DE 2013 .....	81

3.3.7	CASO 7: 11 DE SEPTIEMBRE DE 2013.....	85
3.3.8	CASO 8: 06 DE OCTUBRE DE 2013 .....	90
3.3.9	CASO 9: 11 DE OCTUBRE DE 2013 .....	93
3.3.10	CASO 10: 14 DE NOVIEMBRE DE 2013 .....	97
3.4	CONSTANTES DE AJUSTE Y RANGOS DE INTENSIDAD DE LLUVIA VS REFLECTIVIDAD.....	100
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>104</b>
<b>5</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>Referencia Bibliográfica</b> .....	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>109</b>
7.1	CASO 1: 18 DE JULIO DE 2013 .....	109
7.2	CASO 2: 29 DE JULIO DE 2013 .....	116
7.3	CASO 3: 11 DE AGOSTO DE 2013 .....	118
7.4	CASO 4: 15 DE AGOSTO DE 2013 .....	123
7.5	CASO 5: 19 DE AGOSTO DE 2013 .....	128
7.6	CASO 7: 11 DE SEPTIEMBRE DE 2013 .....	132
7.7	CASO 8: 06 DE OCTUBRE DE 2013.....	136
7.8	CASO 9: 11 DE OCTUBRE DE 2013.....	138
7.9	CASO 10: 14 DE NOVIEMBRE DE 2013.....	143
7.10	DOCUMENTO SAT .....	145

# Índice de Figuras

---

Figura 1.1.1 Sistema Atmosférico observado por un NEXRAD. [3] .....	1
Figura 1.1.2: Muestra el principio básico del radar a través de un pulso transmitido y el eco de retorno. [5] .....	2
Figura 1.1.3: Píxeles de reflectividad para la imagen mosaico de 3 radares FURUNO banda X. .	3
Figura 1.1.4: Una onda de radio polarizada horizontalmente [5]. .....	3
Figura 1.1.5: Una onda de radio de polarización vertical [4]. .....	4
Figura. 1.2.1.1: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de radares meteorológicos [8].....	9
Figura. 1.2.2.1: Detalle de la atenuación del haz al encontrarse un obstáculo. [5].....	10
Figura. 1.2.3.1: <i>Fenómeno de dispersión Rayleigh y Mie</i> [5].....	11
Figura 1.3.1: Tipos de nubes a diferentes alturas [9].....	12
Figura 1.3.1 1: Proceso Adiabático de enfriamiento [9].....	14
Tabla 1.3.2 1: Tipos de lluvia con sus características.....	16
Figura 1.4 1: Mapa de lluvia acumulada esperada para 6 horas generado por el modelo WRF. .	18
Figura 1.4 2: Estaciones aeronáuticas con personal permanente del país: Santa Ana, Acajutla, Ilopango, Comalapa, San Miguel y La Unión. ....	19
Figura 1.5.1 1: Satélites geoestacionarios. [13]. .....	21
Figura 1.5.1 2: Satélites de órbita polar rastrean desde el norte hasta el sur de la Tierra [13].....	22
Figura 1.5.2 1: Imagen satelital visible del 26 de Octubre de 1998. Se puede observar el huracán Mitch al noreste de Centro América. Fuente: NOAA.....	24

Figura 1.5.3 1: Una imagen de satélite infrarroja puede distinguir entre nubes bajas (más calientes) y nubes altas (más frías). Las nubes bajas aparecerán en la imagen de color gris y las altas de color blanco. [13].....	25
Figura 1.5.3 2: Imagen satelital infrarroja del 26 de Octubre de 1998 del Huracán Mitch. Fuente: NOAA.....	26
Figura 1.5.4 1: Imagen satelital de vapor de agua. Fuente: NOAA.....	27
Figura 1.5.5 1: Esquema del principio básico del funcionamiento del radar, donde se observa la radiación reflejada por las gotas de lluvia.....	28
Figura 1.5.5 2: Esquema del proceso general para la producción de imágenes de radar. ....	28
Figura 1.5.5 3. Ubicaciones de los radares LAWR de la red nacional. ....	29
Figura 1.5.5 4: Escala de colores de intensidad de lluvia. ....	30
Figura 1.5.5 5: Fotografías de los sitios en donde se encuentran instalados 6 de los 8 radares meteorológicos nacionales. ....	31
Figura 1.5.6 1: Imagen de radar del sistema LAWR. ....	33
Figura 1.5.8 1: Mapa con la ubicación de la red de estaciones telemétricas automáticas de El Salvador. ....	36
Figura 1.5.8 2: Registro gráfico de la precipitación acumulada de una estación telemétrica. ....	37
Figura 2.1.1: Diseño de un sistema de radar de área local. Fuente: DHI.....	41
Figura 2.1.2: Fotografía que muestra la ubicación del magnetrón en el transceptor. ....	42
Figura 2.1.3: Esquema de la distribución del haz donde el círculo describe cómo toma los datos el LAWR en el plano horizontal y en el plano vertical.....	44
Figura 3.1: Perfiles de elevación: A: Apopa, B: Tonacatepeque, C: Boquerón, D: Picacho.....	53

Figura 3.2: Perfiles de elevación: A: UES, B: Ilopango, C: PROCAFE, D: La Cima .....	54
Figura 3.3: Perfiles de elevación: A: Belloso, B: El Piro. ....	55
Figura 3.1.1: Estaciones telemétricas en imagen pixeles de 240*240 (Izquierda), estaciones telemétricas de San Salvador (Derecha) ambas con 120km de radio. ....	56
Figura 3.1.2: Datos de decibeles actuales del radar LAWR .....	57
Figura 3.1.3: Valores de pixeles propuesta para el radar LAWR .....	57
Figura 3.3.1.1: Imagen satelital infrarroja de las 11:15 horas (hora UTC), 05:15 horas (hora local), del 26 de Julio de 2013. ....	61
Figura 3.3.1.2: Imagen superior: Imagen satelital infrarroja de las 00:15 (hora UTC). Imagen inferior: imagen de radar de las 18:15 (hora local).....	62
Figura 3.3.1.3: Orden descendente: Imagen satelital infrarroja (20:15). Imagen de radar (20:15). Imagen de radar (21:15).....	63
Figura 3.3.2.1: Imágenes satelitales infrarrojas. Orden descendente: 15:15, 16:15, 17:15 horas (hora local).....	67
Figura 3.3.2.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 17:00, 18:00 y 19:00 horas (hora local). ....	68
Figura 3.3.3.1: Imágenes satelitales. Orden descendente: Imagen visible: 13:15 (hora local), imagen infrarroja 13:45 (hora local).....	71
Figura 3.3.3.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 13:00, 13:30 y 14:00 horas (hora local). ....	72
Figura3.3.4.1: Imágenes satelitales infrarrojas. Orden descendente: Imagen: 19:15 (hora local), imagen 23:45 (hora local). ....	75
Figura 3.3.4.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 22:00 y 23:45 horas. ....	76

Figura 3.3.5.1: Orden descendente: Imagen satelital infrarroja de las 21:15 horas e imagen de radar de las 21:15 horas. ....	79
Figura 3.3.5.2: Orden descendente: Imagen satelital infrarroja de las 22:15 horas e imagen de radar de las 22:15 horas. ....	79
Figura 3.3.6.1: Orden descendente: Imagen satelital visible e imagen de radar, ambas de las 12:15 horas (hora local). ....	82
Figura 3.3.7.1: Imagen satelital de vapor de agua de las 08:15 horas (hora local) del 11-09-2013. ....	85
Figura 3.3.7.2: Imagen satelital infrarroja de las 08:15 horas (hora local) del 11-09-2013. ....	86
Figura 3.3.7.3: Imagen de radar de las 10:15 horas del 11-09-2013. ....	86
Figura 3.3.7.4: Orden descendente: Imagen satelital visible e imagen satelital infrarroja de las 10:15 horas (hora local). ....	87
Figura 3.3.8.1: Imágenes satelitales visibles. Orden descendente: 11:45 y 12:45 horas (hora local). ....	90
Figura 3.3.8.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 11:45 y 12:45 horas. ....	91
Figura 3.3.9.1: Imagen satelital infrarroja de las 21:45 horas (hora local). ....	93
Figura 3.3.9.2: Imagen satelital infrarroja de las 21:45 horas (hora local). ....	94
Figura 3.3.9.3: Imagen de radar de las 21:45 horas. ....	94
Figura 3.3.9.4: Imagen de radar de las 22:45 horas. ....	95
Figura 3.3.10.1: Imágenes satelitales infrarrojas. Orden descendente: 20:45 y 22:45 horas (hora local). ....	97
Figura 3.3.10.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 20:45 y 22:45 horas. ....	98

# Indice de Tablas

---

Tabla 1.2.1.1 : Diferentes tipos de radares [7] .....	8
Tabla 1.2.1.2: Información de radares banda x.....	9
Tabla 1.3.2 1: Tipos de lluvia con sus características.....	16
Tabla 1.2.1.1 : Diferentes tipos de radares [7] .....	8
Tabla 1.2.1.2: Información de radares banda x.....	9
Tabla 1.3.2 1: Tipos de lluvia con sus características.....	16
Tabla 1.5.7 1: Estructura básica de un METAR.....	34
Tabla 3.1: Estaciones telemétricas seleccionadas con sus coordenadas y pixeles correspondientes. .....	52
Tabla 3.1.1: Datos RGB de los colores de la nueva paleta de colores.....	57
Tabla 3.1.2: Significado del código de colores de la nueva paleta de colores del radar de San Salvador según su RGB. ....	58
Tabla 3.2.1: Muestra la salida de datos al hacer la implementación del script.....	60
Tabla 3.3.1.1: Lluvia acumulada entre las 20:50 y las 23:50. ....	64
Tabla 3.3.2.1: Lluvia acumulada entre las 17:10 y las 19:10. ....	69
Tabla 3.3.3.1: Lluvia acumulada entre las 13:10 y las 14:10. ....	73
Tabla 3.3.4.1: Lluvia acumulada entre las 22:50 y las 24:00 horas.....	77
Tabla3.3.5.1: Lluvia acumulada entre las 21:50 y las 24:00 horas.....	80
Tabla 3.3.6.1: Lluvia acumulada entre las 10:50 y las 14:30 horas.....	83

Tabla 3.3.7.1: Lluvia acumulada entre las 09:40 y las 14:30 horas.....	88
Tabla 3.3.8.1: Lluvia acumulada entre las 12:40 y las 14:10 horas.....	92
Tabla 3.3.9.1: Lluvia acumulada entre las 19:30 y las 24:00 horas.....	95
Tabla 3.3.10.1: Lluvia acumulada entre las 20:00 y las 22:50 horas.....	99
Tabla 3.4.1: Constantes de ajuste, constantes promedio para cada estación y constante promedio general.....	101
Tabla 3.4.2: Rangos aproximados de reflectividad vs intensidad de lluvia.....	103
Tabla 3.1: Estaciones telemétricas seleccionadas con sus coordenadas y pixeles correspondientes. .....	52
Tabla 3.1.1: Datos RGB de los colores de la nueva paleta de colores.....	57
Tabla 3.1.2: Significado del código de colores de la nueva paleta de colores del radar de San Salvador según su RGB. ....	58
Tabla 3.2.1: Muestra la salida de datos al hacer la implementación del script.....	60
Tabla 3.3.1.1: Lluvia acumulada entre las 20:50 y las 23:50. ....	64
Tabla 3.3.2.1: Lluvia acumulada entre las 17:10 y las 19:10. ....	69
Tabla 3.3.3.1: Lluvia acumulada entre las 13:10 y las 14:10. ....	73
Tabla 3.3.4.1: Lluvia acumulada entre las 22:50 y las 24:00 horas.....	77
Tabla3.3.5.1: Lluvia acumulada entre las 21:50 y las 24:00 horas.....	80
Tabla 3.3.6.1: Lluvia acumulada entre las 10:50 y las 14:30 horas.....	83
Tabla 3.3.7.1: Lluvia acumulada entre las 09:40 y las 14:30 horas.....	88
Tabla 3.3.8.1: Lluvia acumulada entre las 12:40 y las 14:10 horas.....	92

Tabla 3.3.9.1: Lluvia acumulada entre las 19:30 y las 24:00 horas.....	95
Tabla 3.3.10.1: Lluvia acumulada entre las 20:00 y las 22:50 horas.....	99
Tabla 3.4.1: Constantes de ajuste, constantes promedio para cada estación y constante promedio general.....	101
Tabla 3.4.2: Rangos aproximados de reflectividad vs intensidad de lluvia.....	103

## Índice de Gráficos

---

<i>Grafico 3.3.1.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 20:50 y 23:50.....</i>	65
<i>Grafico 3.3.1.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....</i>	66
<i>Grafico 3.3.2.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 17:10 y 19:10.....</i>	70
<i>Grafico 3.3.2.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....</i>	70
<i>Grafico 3.3.3.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 13:10 y 14:10.....</i>	74
<i>Grafico 3.3.3.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....</i>	74
<i>Grafico 3.3.4.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 22:50 y 24:00 horas.....</i>	77
<i>Grafico 3.3.4.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....</i>	78
<i>Grafico 3.3.5.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 21:50 y 24:00 horas.....</i>	81
<i>Grafico 3.3.5.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....</i>	81

<i>Grafico 3.3.6.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 21:50 y 24:00 horas.....	84
<i>Grafico 3.3.6.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....	84
<i>Grafico 3.3.7.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 09:40 y 14:30 horas.....	89
<i>Grafico 3.3.7.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....	89
<i>Grafico 3.3.8.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 12:40 y 14:10 horas.....	92
<i>Grafico 3.3.8.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....	93
<i>Grafico 3.3.9.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 19:30 y 23:50 horas.....	96
<i>Grafico 3.3.9.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....	96
<i>Grafico 3.3.10.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 20:00 y 22:50 horas.....	99
<i>Grafico 3.3.10.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....	100
<i>Grafico 3.4.1:</i> Curva refleja la cantidad de Dbz promedio y la tasa de lluvia para todos los estudios de casos. ....	101
<i>Grafico 3.4.2:</i> Línea de tendencia o mejor ajuste para la curva de dBz vs tasa de lluvia.....	102
<i>Grafico 3.3.1.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 20:50 y 23:50.....	65
<i>Grafico 3.3.1.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h). ....	66
<i>Grafico 3.3.2.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 17:10 y 19:10.....	70

<i>Grafico 3.3.2.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	70
<i>Grafico 3.3.3.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 13:10 y 14:10.</i> .....	74
<i>Grafico 3.3.3.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	74
<i>Grafico 3.3.4.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 22:50 y 24:00 horas.</i> .....	77
<i>Grafico 3.3.4.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	78
<i>Grafico 3.3.5.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 21:50 y 24:00 horas.</i> .....	81
<i>Grafico 3.3.5.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	81
<i>Grafico 3.3.6.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 21:50 y 24:00 horas.</i> .....	84
<i>Grafico 3.3.6.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	84
<i>Grafico 3.3.7.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 09:40 y 14:30 horas.</i> .....	89
<i>Grafico 3.3.7.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	89
<i>Grafico 3.3.8.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 12:40 y 14:10 horas.</i> .....	92
<i>Grafico 3.3.8.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	93
<i>Grafico 3.3.9.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 19:30 y 23:50 horas.</i> .....	96
<i>Grafico 3.3.9.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).</i> .....	96

<i>Grafico 3.3.10.1:</i> Curvas de lluvia acumulada entre las 20:00 y 22:50 horas.....	99
<i>Grafico 3.3.10.2:</i> Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).....	100
<i>Grafico 3.4.1:</i> Curva refleja la cantidad de Dbz promedio y la tasa de lluvia para todos los estudios de casos.....	101
<i>Grafico 3.4.2:</i> Línea de tendencia o mejor ajuste para la curva de dBz vs tasa de lluvia.....	102

## **Resumen**

El radar meteorológico de área local, LAWR, es un radar que está basado en la tecnología de banda X. El LAWR provee imágenes de radar de alta calidad, tanto de precipitaciones localizadas hasta en un área de 11,300 km<sup>2</sup>, con alcances de cobertura que van desde 60-120 km de radio detectadas cada 5 minutos o cada minuto según se configure.

El radar meteorológico de área local LAWR es manufacturado y comercializado por DHI, que es una organización de consultoría internacional independiente.

El costo total de un radar LAWR excluyendo impuestos (IVA, etc.) es a partir de 138,000 dólares.

Desde el año 2010 a 2012, el MARN adquirió e instaló a través de DHI una red nacional de 8 radares LAWR en El Salvador. Ésta es parte del sistema de alerta de crecidas de ríos y/o quebradas, inundaciones y deslizamientos de tierras manejada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. La red de radares LAWR ha fortalecido la información disponible de precipitación en todo el país para el uso de especialistas meteorólogos, hidrólogos y geólogos en sus esfuerzos para producir alertas efectivas y oportunas en contra de inundaciones, crecidas de ríos y/o quebradas y deslizamientos de tierras.

De los 8 radares meteorológicos, 3 de ellos (Santa Ana, San Salvador y San Miguel) se encuentran en operación desde el año 2010; la segunda fase de 3 radares (Sonsonate, La Laguna y Zacatecoluca) está en operación desde el año 2011. En el mes de octubre del año 2012 se instalaron 2 radares más, uno en Victoria (Cabañas) y el otro en Puerto Parada (Usulután).

## **Introducción**

La información meteorológica es de gran importancia dentro de la sociedad y la industria así como también en la agricultura, la construcción, la protección civil, el sector energético, salud, turismo etc. Es muy valioso saber interpretar los parámetros del clima y el tiempo para poder usarlo en favor del desarrollo de estos sectores. Por ejemplo en el sector agrícola, la información oportuna de lluvia puede colaborar al incremento de la producción agrícola, optimizando el manejo de la semilla y mantenimiento de los equipos. En el sector energético, el conocimiento de las condiciones hidrometeorológicas y los fenómenos atmosféricos, permitirá mejorar el manejo de las descargas hídricas en las represas hidroeléctricas con el fin de prevenir inundaciones en las comunidades río abajo. En las actividades para la protección civil ante amenazas naturales juega un rol muy importante para la producción de sistemas de alertas tempranas, que puedan generar mejores medidas preventivas. En el sector salud contribuye a la prevención y control de epidemias provocadas por cambios en el medio ambiente. En la construcción, para la mejor planificación de las obras, etc.

Para contribuir a estos sectores y en particular a la protección civil uno de los objetivos de esta investigación fue lograr optimizar y automatizar los datos de reflectividad del radar de San Salvador de banda X de la red nacional de radares meteorológicos para así luego realizar la estimación de la intensidad de la lluvia versus la cantidad de lluvia registrada por la red telemétrica en cada uno de los 12 casos de estudios analizados, ya fuese ante eventos de tormentas débiles, moderadas o fuertes a nivel local y así se obtuvo un Sistema de Alerta Temprana (SAT).

En la metodología de este trabajo se utilizó la ecuación de Marshall-Palmer para realizar la estimación de intensidad de lluvia por medio de los datos de reflectividad de los radares meteorológicos en conjunto de 10 estaciones telemétricas que se encuentran en un radio no mayor a 20km desde el radar de San Salvador. Se realizaron trabajos preliminares sobre la distribución de lluvias para diferentes estudios de casos para así lograr obtener una constante de ajuste que englobara cada estación telemétrica virtual, ayudándonos así a una mejor comprensión de la correlación entre los valores de reflectividad de radar e intensidad de lluvia. Actualmente la ecuación de Marshall-Palmer sigue siendo ampliamente utilizada para la estimación de

intensidad de lluvias por medio de reflectividad de radar y se ha realizado este trabajo para ajustar los valores de la constante para diferentes tipos de precipitación y áreas de San Salvador para llegar a obtener una mejor aproximación a los datos reales de lluvia que caen en un área en específico.

# 1 Fundamento Teórico

## 1.1 Fundamentos básicos de radares meteorológicos

Radar es el acrónimo de “Radio Detection And Ranging”. El concepto básico de un radar es la emisión de un pulso electromagnético a la velocidad de la luz que es reflejada por las partículas en la atmósfera [2]. En principio todos los objetos en el camino del pulso emitido reflejan la energía electromagnética como por ejemplo lluvia, nieve o granizo. Otros tipos de objetos que provocan reflexión pueden ser edificios, colinas, aviones, polvo y grandes enjambres de insectos, etc.

“La tecnología de radar se ha utilizado desde la Segunda Guerra Mundial, cuando el personal militar que observaba el movimiento de las aeronaves y los buques enemigos descubrió que en las pantallas del radar también aparecía la precipitación. Al final de la guerra, el radar había avanzado considerablemente y la comunidad científica comenzó a usar los equipos de radar militares excedentes para estudiar y observar los fenómenos meteorológicos”. [3]

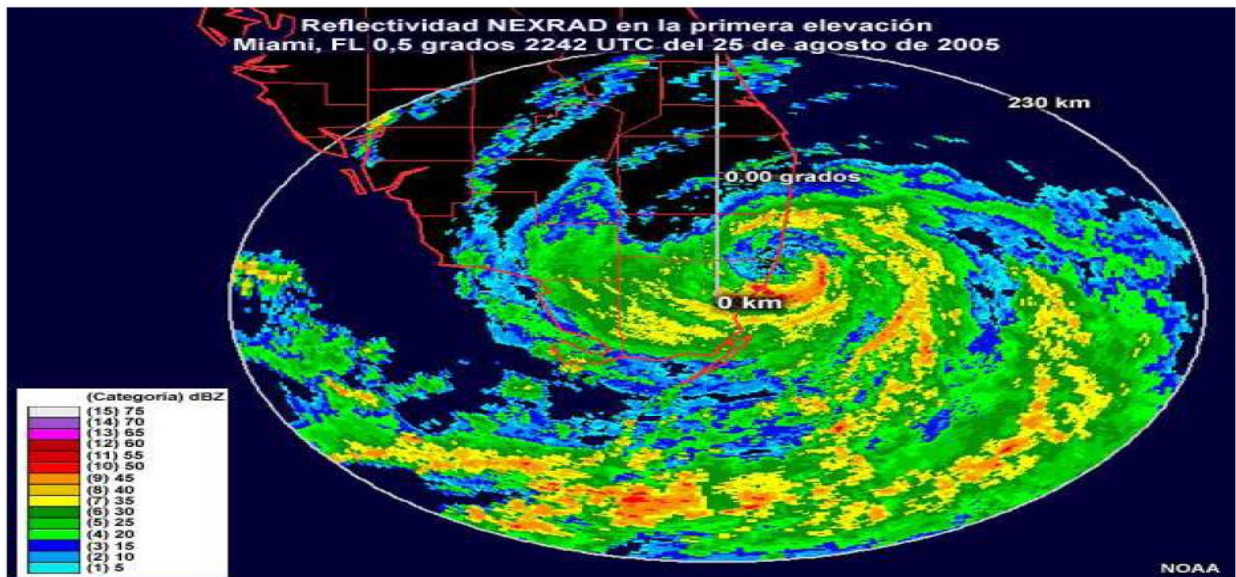


Figura 1.1.1 Sistema Atmosférico observado por un NEXRAD. [3]

El radar le sirve al meteorólogo para [4]:

- Interpretar la intensidad y el movimiento de la precipitación mediante imágenes de reflectividad de los datos del radar;
- Usar imágenes radar para identificar ciertos fenómenos que pueden ocurrir en condiciones de tiempo generalmente buenas, como las tormentas de polvo y arena, el humo, los vórtices convectivos horizontales, los frentes y otros tipos de fronteras;
- Usar imágenes radar para identificar las estructuras comunes de los fenómenos que producen precipitación, como las tormentas, la convección y los ciclones tropicales;
- Usar imágenes de radar para identificar las anomalías de propagación, aliasing (solapamiento) por ambigüedad de velocidad o distancia, blancos no meteorológicos y otros artefactos de las imágenes radar.

El radar meteorológico funciona emitiendo a la atmósfera pulsos de energía electromagnética en el rango de frecuencias de las microondas. Cuando dichos pulsos inciden en un objeto, parte de esa energía electromagnética se devuelve hacia el radar (ver figura 1.1.2). Esta “retrodifusión” explica porque hablamos de “reflectividad radar”. La reflectividad es una medida de la capacidad de los blancos de interceptar y devolver la energía del radar, y depende de los parámetros físicos del objeto, como su tamaño, forma, orientación, composición, etc.

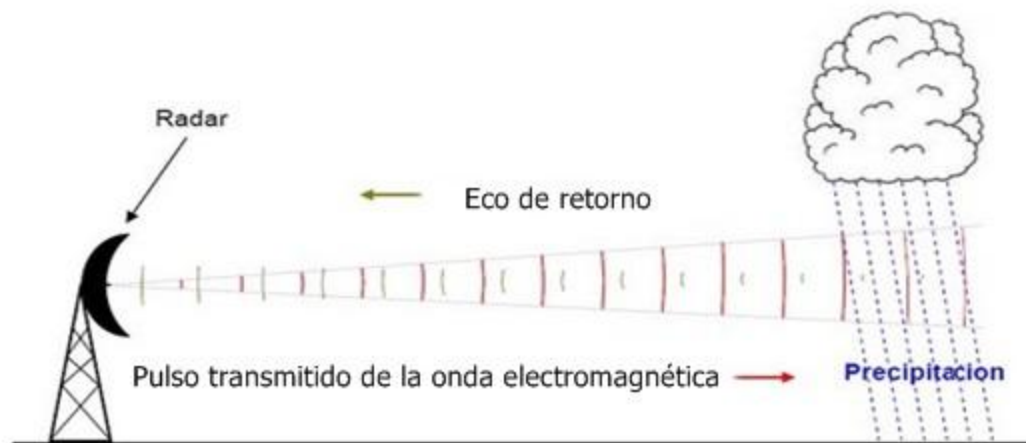


Figura 1.1.2: Muestra el principio básico del radar a través de un pulso transmitido y el eco de retorno. [5]

La energía devuelta al radar se analiza en sistemas informáticos para determinar la posición e intensidad de la precipitación y derivar información sobre la velocidad y la dirección del viento. Finalmente, esta información se utiliza para generar imágenes [5], como se muestra en la

siguiente figura 1.1.3 de la red de radares LAWR (Local Area Weather Radar: radares de área local) de El Salvador.

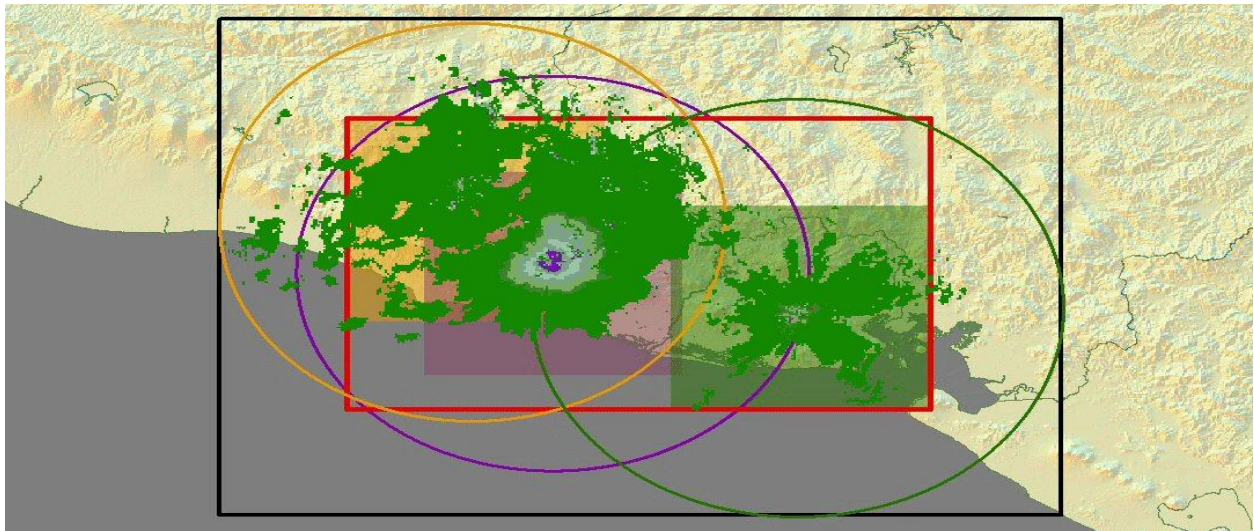


Figura 1.1.3: Píxeles de reflectividad para la imagen mosaico de 3 radares FURUNO banda X.

Los Radares polarimétricos miden la potencia reflejada de regreso de los pulsos horizontales y verticales, que son una combinación de las figuras 1.1.4 y 1.1.5. Mediante la comparación de estas potencias reflejadas de diferentes maneras (razones, correlaciones, etc.), es posible obtener información sobre la densidad, tamaño y forma de las partículas en precipitación.

El radar Doppler mide el cambio en la frecuencia de microondas causada por objetos en movimiento, y por lo tanto es capaz de determinar la velocidad del blanco, pero no transversalmente a la dirección del haz del radar.

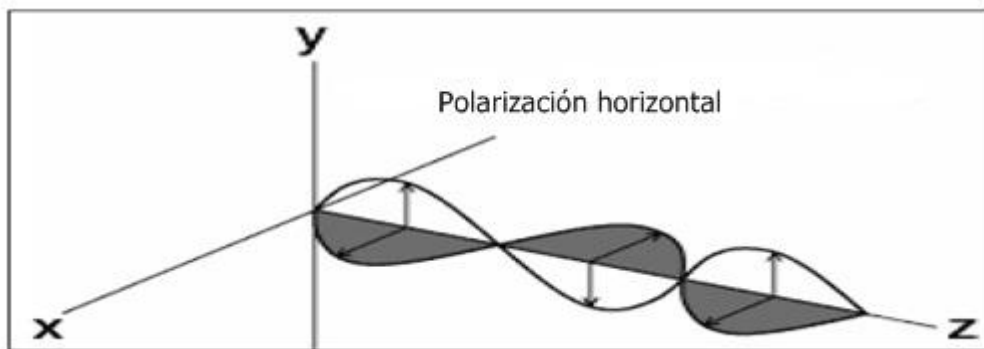


Figura 1.1.4: Una onda de radio polarizada horizontalmente [5].

La cresta de la ola de campo eléctrico está orientada en la dirección horizontal (áreas oscuras).  
La cresta de la ola campo magnético está orientado en la dirección vertical (blanco) [5].

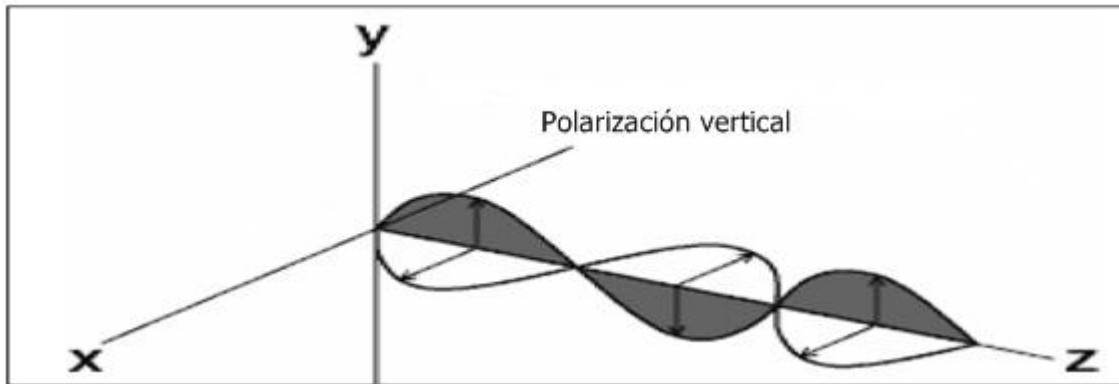


Figura 1.1.5: Una onda de radio de polarización vertical [4].

La cresta de la ola de campo eléctrico está orientada en la dirección vertical (áreas oscuras). La cresta de la ola campo magnético está orientado en la dirección horizontal (blanco) [4].

### 1.1.1 Escalas de reflectividad

Como estos valores abarcan varios órdenes de magnitud y son difíciles de representar gráficamente con suficiente detalle, normalmente los productos radar emplean una escala logarítmica en decibeles de Z (dBZ) que resulta más fácil de interpretar:

$$dBZ = 10 \log_{10} \frac{Z}{mm^6/m^3} \quad (1)$$

Donde Z es la reflectividad.

La escala suele abarcar de -28 a +28 dBZ en modo aire claro y de 0 a 75 dBZ en modo precipitación [5].

La Reflectividad no depende del radar es una propiedad del objetivo meteorológico, y depende del espectro de partículas, z, en minúsculas, se expresa en  $mm^6/m^3$  (milímetros a la sexta potencia/ metros cúbicos) indica la sumatoria de todos los diámetros elevados a la sexta potencia, de las partículas contenidas en un volumen dado.

Como sabemos, hay objetos meteorológicos que contienen partículas de un gran diámetro, el cual elevado a la sexta potencia arrojan valores (aunque sea una sola partícula) entre 1, 000,000 y 10, 000,000. También hay otros objetos meteorológicos que están compuestos por muy pocas gotas de un diámetro muy pequeño, entonces z arroja valores muy pequeños incluso menor que  $1 mm^6/m^3$ .

Como vemos, z se expande en un rango de valores que va desde  $0.001 mm^6/m^3$  hasta  $10, 000,000 mm^6/m^3$ . Trabajar con estos números resulta incómodo, por ello se aplica la ecuación 1 para llevarlo a una escala logarítmica. De este modo, se tendrá:

$z = 10, 000,000 mm^6/m^3$  se representa como 70 dBZ (es decir 70 decibeles con respecto a una  $z = 1 mm^6/m^3$ ), o sea que es un valor relativo referenciado a este valor.

$z = 1, 000,000 mm^6/m^3$  se representa como 60 dBZ

$z = 0.01 mm^6/m^3$  se representa como -20 dBZ ahora con signo negativo indicando que estamos por debajo en magnitud del valor de referencia que es  $1 mm^6/m^3$ .

La cualidad Doppler se refiere solamente a la capacidad del radar para estimar las velocidades radiales de los objetos meteorológicos, así que la ecuación 1 es aplicable a cualquiera de los radares meteorológicos.

### **1.1.2 Longitud de onda del radar.**

Si la longitud de onda del radar es mucho mayor que las dimensiones de las partículas que está iluminando, entonces sucede la dispersión de Rayleigh en la que la reflectividad es proporcional a la sumatoria de los diámetros de las gotas de lluvia a la sexta potencia divididos por el volumen total. Por ejemplo en los radares de banda S, que tienen una longitud de onda de 10 cm, esto es válido prácticamente para todos los tipos de precipitación, excepto para granizos de gran tamaño. Si la longitud de onda del radar es comparable o inferior a las dimensiones de las partículas con las que interactúa, entonces se tiene la dispersión de Mie.

En el caso de los radares de banda X que produce una radiación de longitud de onda de 3 cm, cuando su radiación interactúa con la lluvia se considera que sucede la dispersión de Rayleigh, ya que por lo general, las gotas de lluvia tienen un diámetro que oscila entre los 0.1 mm a 5 mm en promedio, aunque se han registrado gotas hasta de un tamaño de 8 a 12 mm, siguen siendo menor a la longitud de onda del radar de banda X.

Además tenemos el problema de la atenuación, la banda X se atenúa fuertemente impidiendo al radar ver precipitaciones por detrás de otra precipitación. Es por esto que los radares de banda X, o bien no observan correctamente la precipitación (en el caso de mucha atenuación), o no estiman correctamente la reflectividad y por tanto la precipitación.

## **1.2 Sistema de radares meteorológicos de área local (LAWR)**

Durante exploración normal el radar funciona con un radio de 60 kilómetros para avisos de lluvias y hasta 20 kilómetros para la medición de lluvias. El rango que se consigue en una ubicación específica y en una dirección específica varía dependiendo de las condiciones en general

### 1.2.1 Rango y Precisión

Uno de los parámetros más importantes para un sistema de previsión es el conocimiento de la cantidad y distribución de la precipitación sobre la cuenca. Con la introducción del LAWR, es ahora posible conseguir información con una resolución en tiempo de 5 minutos y con una resolución en espacio desde 500 por 500 metros hasta 100 por 100 metros. La resolución más alta de 100 por 100 metros, se puede obtener hasta una distancia máxima de entre 6 y 10 kilómetros del radar (esto es así para cualquier radar meteorológico con una anchura de haz de un grado, ya que la anchura del haz supera 100 metros en una distancia de 5.7 kilómetros del radar).

Aunque el LAWR solo emite una décima parte 25 kW de la energía emitida por los radares meteorológicos convencionales de 250 kW, es capaz de penetrar lluvias muy intensas dentro de su radio de acción de 60 kilómetros. Esto es posible porque el volumen escaneado por el LAWR es más grande que el de un radar meteorológico convencional. Además, la longitud de onda es menor que 3 centímetros en banda X, comparado con 5 centímetros para radares de banda C y 10 centímetros de radares banda S. En contra de esto trabaja la ganancia de la antena, la cual es más pequeña (15-20 dB) desde la antena del LAWR, comparado con los radares meteorológicos convencionales (30–45 dB). El resultado de esto es que 1 kW del LAWR es cuatro veces más potente que un 1 kW de un radar de la banda C y 8 veces más potente que 1 kW de un radar de banda S, suponiendo que el volumen vertical está lleno.

De manera similar, eventos menos intensos que no tienen un tamaño local pueden no ser detectados a una distancia que supera entre 20 y 30 km.

Los radares utilizados en este estudio son radares meteorológicos de área local de banda X. El LAWR no miden la lluvia directamente, pero si la cantidad de energía reflejada, y por lo tanto, se puede cualificar sus intensidades. Diferentes tipos de radares se utilizan para la detección de fenómenos meteorológicos, hay tres grupos de radares: polarimétricos, no polarimétricos y Doppler y dentro de estos grupos hay diferentes tipos de radares identificados por su frecuencia o longitud de onda. Los diferentes tipos de radares meteorológicos se listan en la tabla 1.2.1.1 y las ventajas y desventajas de los mismos se pueden ver en la figura 1.2.1.1

Los radares meteorológicos operan en el rango de frecuencias de 1,500 MHz a 30,000 MHz o son descritos por la longitud de onda de 1 a 20 cm. Debido a que las longitudes de onda varían con el tipo de radar es posible detectar diferentes tamaños de objetivos con diferentes tipos de radares. El radar LAWR de banda X marca FURUNO modelo FAR2127, trabaja con una frecuencia de ~ 10,000 MHz y una longitud de onda de 3 cm.

Tabla 1.2.1.1: Diferentes tipos de radares [7]

BANDA	Frecuencia (MHz)	Longitud de Onda $\lambda$ (cm)
L	1,500	20
S	3,000	10
C	6,000	5
X	10,000	3
K	30,000	1

La ventaja de los radares de banda S es que no se ven afectados por la atenuación espacial, y sus dos principales desventajas son: poca resolución espacial y el precio es demasiado elevado. Con respecto a los radares de banda C su principal ventaja es la portabilidad y su desventaja es verse afectados por la atenuación, el costo de estos radares también es muy elevado en comparación a los de banda X. Los radares de banda X tienen mayor resolución espacial, es decir, muy sensitivos a las partículas de pequeño tamaño, son de fácil portabilidad, son muy útiles para observar el desarrollo de nubes y el precio es muy bajo comparado con los otros dos, su desventaja es ser enormemente afectados por la atenuación.

Los radares de banda K son capaces de detectar las diminutas gotitas que están suspendidas en una nube, a pesar de que no se están produciendo precipitaciones, mientras que un radar de banda X sólo detecta las gotas de lluvia.

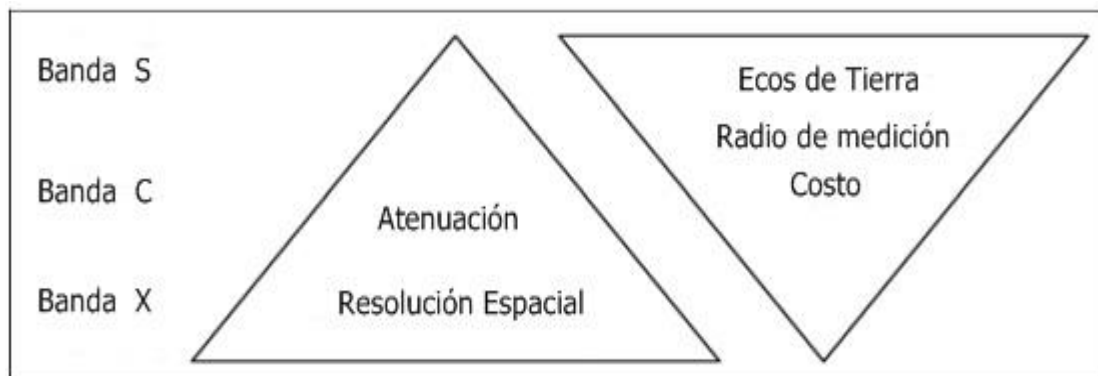


Figura. 1.2.1.1: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de radares meteorológicos [8]

El radar meteorológico usado en este estudio, LAWR banda X, es no-polarimétrico, lo que significa que sólo miden la reflectividad horizontal, es decir, los pulsos horizontales devueltos emitidos por el radar [5].

Tabla 1.2.1.2: Información de radares banda x

Tipo radiador	XN-4 <sup>a</sup>	XN-5 <sup>a</sup>
Longitud	8ft	10ft
Ancho del haz (H)	0.95°	0.75°
Ancho del Haz (W)	20°	20°
Rotación	18/22rpm	22 rpm
Caja de Cambios (Gear box)	RSB-106	RSB-107
Frecuencia	9410 MHz±30MHz	

### 1.2.2 Atenuación

La atenuación provocada por la absorción de la energía electromagnética por parte de los “blancos” es insignificante debido a que se asume que las gotas de lluvia tienen simetría esférica. El grado de atenuación que puede ocurrir depende en gran medida de la intensidad

de la precipitación y de la longitud de onda de los pulsos transmitidos por el radar. En la siguiente ilustración se observa que las partículas del cuadrado más cercano absorben la mayor parte de la energía emitida por el radar, de modo que los ecos más fuertes provienen de esa zona y no del cuadrado más alejado, pese a que contiene casi la misma cantidad de blancos.

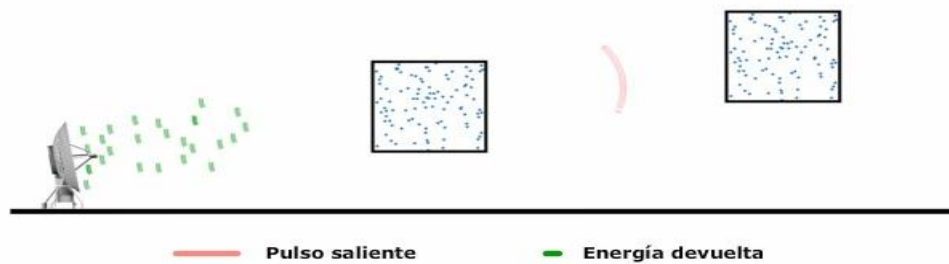


Figura. 1.2.2.1: Detalle de la atenuación del haz al encontrarse un obstáculo. [5]

Considere la situación en la que se ha formado una fuerte tormenta cerca del radar (ver figura 1.2.2.1). La atenuación que ocurre en el núcleo de intensas precipitaciones de la tormenta más cercana puede hacer que las zonas de precipitación más alejadas parezcan menos intensas de lo que son. En casos de atenuación muy fuerte, es posible que parte de la precipitación que ocurre a mayor distancia no aparezca en absoluto en la imagen.

### 1.2.3 Homogeneidad

Cuando el radar detecta lluvia, todos los blancos (gotas de lluvia) pueden ser considerados como pequeñas partículas esféricas y homogéneas cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda del radar.

Cuando el tamaño de una partícula es mucho menor que la longitud de onda del radar, existe una relación casi lineal para la cantidad de dispersión que ocurre. Esto es así para la mayor parte de la precipitación, ya que en promedio el diámetro de las gotas de lluvia oscila entre 0.1 y 5 mm. Cuando el tamaño de una partícula es aproximadamente igual que la longitud de onda del radar o un poco más grande, la dispersión provocada por las partículas se vuelve más complicada y corresponde a la dispersión de Mie [5].

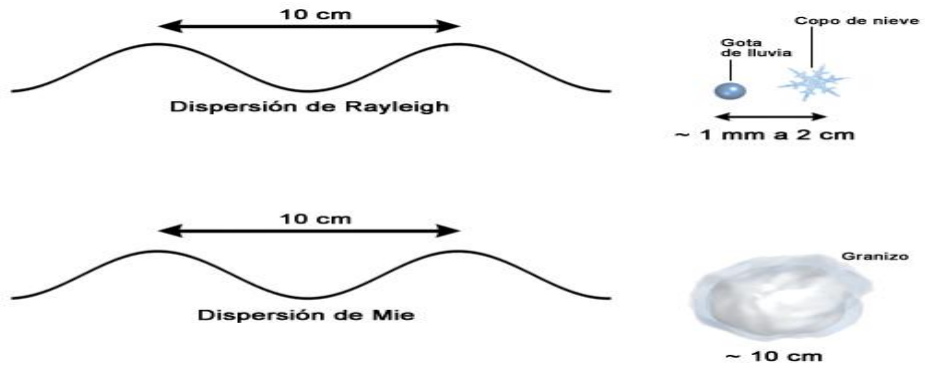


Figura. 1.2.3.1: Fenómeno de dispersión Rayleigh y Mie [5]

### 1.3 Procesos meteorológicos

Los datos de precipitación son normalmente tomados con pluviómetros a nivel de superficie a una distancia de 1.5m de altura. En la superficie la precipitación está en forma de gotas de lluvia con diámetros alrededor de 0-8mm, arriba en la atmosfera la precipitación puede ser encontrada en diferentes rangos dependiendo de la altitud y el tipo de proceso que crea esta precipitación. Además de la precipitación, las condiciones del viento son muy diferentes en la atmosfera comparadas con las condiciones del viento que se obtienen alrededor de los pluviómetros.

Debido a los cambios que sufre la atmosfera con respecto a la altitud es importante entender los procesos meteorológicos que crean la precipitación. En este estudio se utilizará un radar meteorológico con gran apertura vertical de ángulos, como resultado el radar puede medir en lo alto de la atmosfera como se observa en la figura 1.3.1, donde el tope del haz del radar es ilustrado en relación de los diferentes tipos de nubes

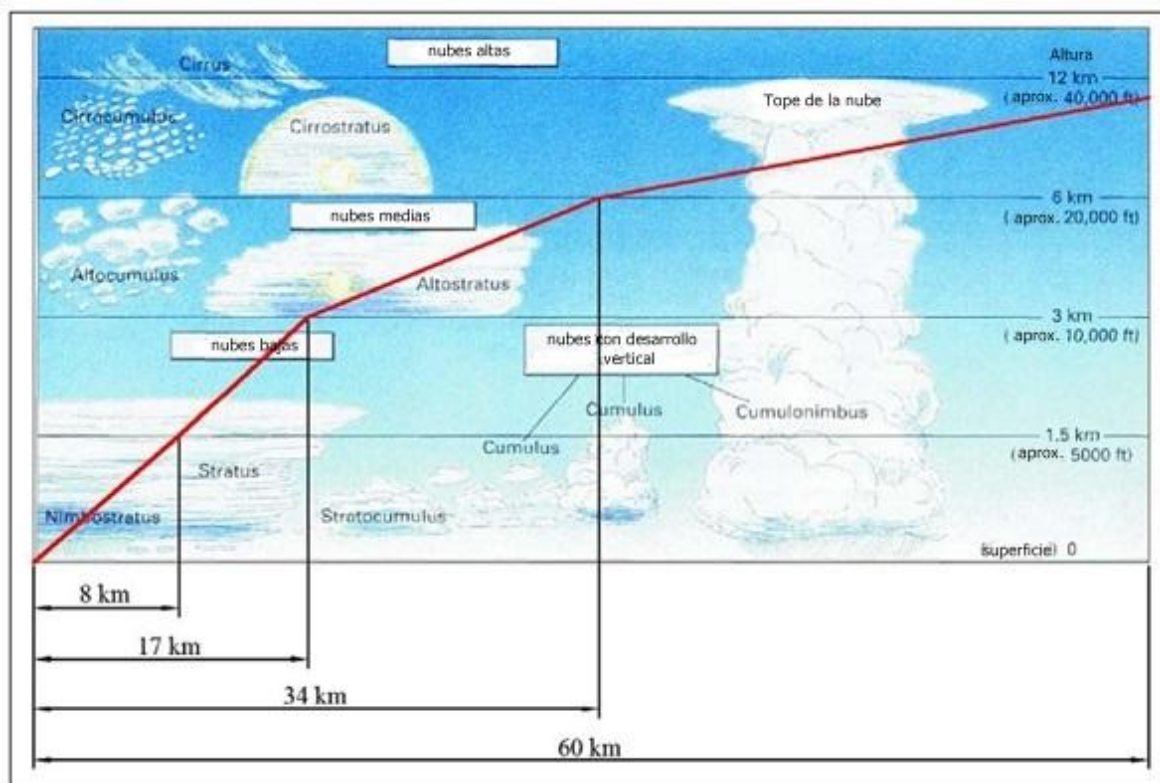


Figura 1.3.1: Tipos de nubes a diferentes alturas [9].

En la figura 1.3.1 se ilustran los diferentes tipos de nubes con sus diversos tipos de precipitación, como en este estudio se hará uso de los diversos tipos de precipitación es importante hacer una breve descripción de cada uno de ellos así como una descripción de los procesos meteorológicos que generan las nubes y la precipitación. La línea roja es una trayectoria aproximada a la del haz del radar LAWR, el cual se asume que está localizado al nivel de la tierra al lado izquierdo de la imagen.

### **1.3.1 Procesos de creación de Nubes y precipitación**

Las nubes se agrupan en dos grupos principales - estratiformes (capas de nubes) o cumuloformes (globular de nubes) donde ambos tipos se ilustran en la Figura 1.3.1. Cuando una capa de aire es forzada sobre otra se logra obtener las nubes estratiformes, y debido a este da como resultado una gran área que está sujeta a la condensación, ya que es forzada hacia arriba. Las nubes cumuloformes son pequeñas parcelas de aire ascendente que son más calientes que sus alrededores. A medida que se mueve hacia una mayor altitud la parcela de aire se enfría y al suceder eso se produce la condensación y se forma la nube.

Las nubes se generan de flujo de aire caliente ascendente, el cual se describe como un proceso adiabático: cuando un gas se deja expandir, su temperatura desciende. El proceso se ilustra en la figura 1.3.1.1. Este fenómeno físico es la clave del proceso en la formación de nubes y la precipitación, ya que cuando una masa de aire caliente es forzada hacia arriba, el aire se enfría como resultado de la caída de la presión atmosférica y de este modo el resultado de la condensación es la precipitación [9].

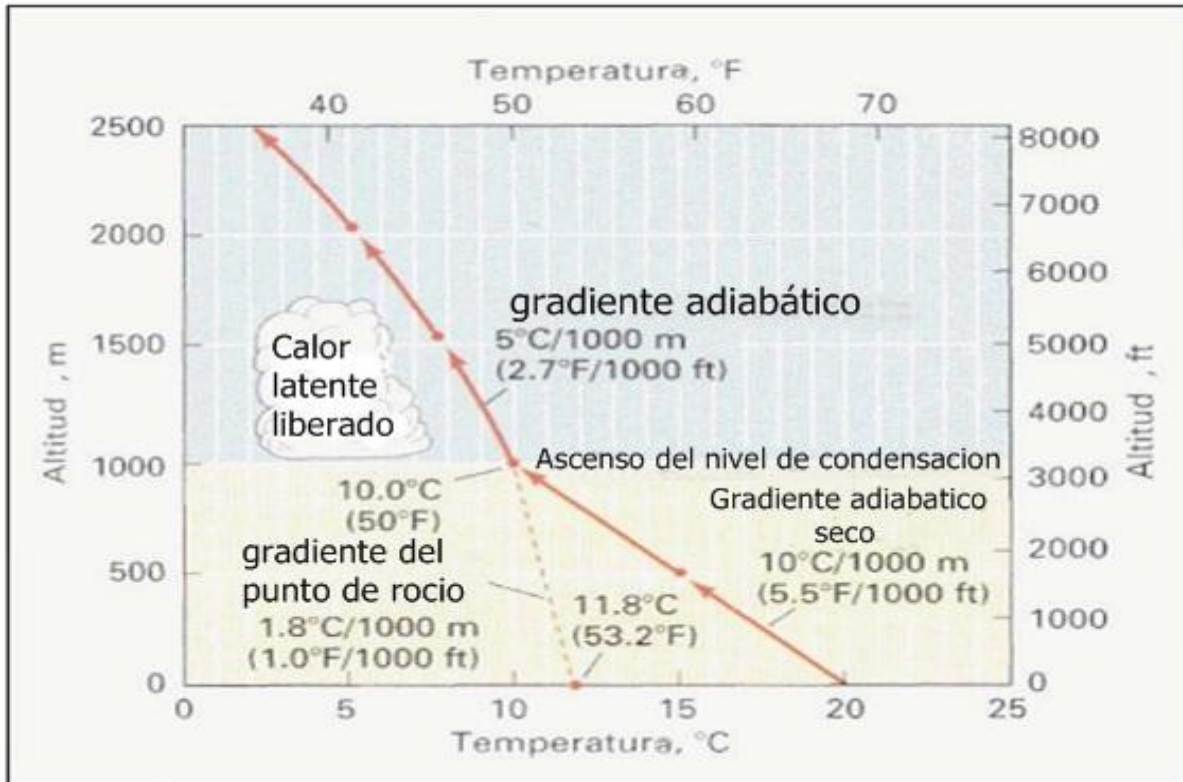


Figura 1.3.1 1: Proceso Adiabático de enfriamiento [9]

La tasa adiabática seca describe el comportamiento de una parcela de aire ascendente que aún no ha llegado a la saturación. La tasa es de aproximadamente  $10^{\circ}\text{C}$  por 1000 metros. Cuando el aire se ha enfriado hasta el punto de rocío la condensación comienza a ocurrir, el cual es referido como el nivel de condensación en la figura 1.3.1.1. El nivel de condensación se determina por la temperatura inicial del aire y de su punto de rocío.

Si el proceso de enfriamiento continúa, las gotas de agua se forman y producen una nube. Dentro de la nube, las gotas más grandes empiezan a caer, y como se encuentran con otras gotas, crecen en tamaño y aumentan su velocidad de caída. Cuando la velocidad de caída excede la velocidad de la corriente ascendente en la nube, las gotas se caen de la nube en forma de lluvia. Si una nube sigue aumentando, la condensación causa la liberación de calor latente y los dos procesos trabajan unos con los otros.

Las nubes contienen gotitas de agua, partículas de hielo o ambas en suspensión en el aire y son la prueba visible de que la atmósfera contiene agua. Las gotas de agua tienen diámetros en el

intervalo de 20 a 50 micras [9]. Cada una de las gotas de las nubes se forma sobre un núcleo de condensación que es una partícula sólida, por ejemplo, un grano de polvo. Los núcleos de condensación varían de 0.1 a 1 micra [10]. La precipitación se forma dentro de las nubes en dos procesos diferentes en función de la temperatura de la nube.

En una nube cálida las gotitas crecen por condensación agregada de 0.05 hasta 0.1 mm de diámetro. En la colisión con otras gotitas crecen aproximadamente 0.5 mm de diámetro, que corresponde con el tamaño de las gotitas de agua en llovizna. Para formar la lluvia, más colisiones adicionales son necesarias para aumentar el tamaño de la gota. Una gota de lluvia promedio tiene un diámetro de aproximadamente 1 a 2 mm, pero pueden llegar hasta un diámetro de 8mm. Por encima de este diámetro se vuelven inestables y se rompen en pequeñas gotas en el proceso de caída [9].

En las nubes frías una mezcla de cristales de hielo y gotas súper enfriadas de agua producen nieve. Mientras que los cristales de hielo toman el vapor de agua y crecen, las gotas de agua súper enfriada pierden agua por evaporación, y como resultado se encogen. Si un cristal de hielo choca con las gotas de agua sobre-enfriada induce la congelación en la gota de agua. Los cristales de hielo colisionan continuamente y con el tiempo se convierten en partículas de nieve que empiezan a caer. Si la temperatura está por debajo del punto de congelación en la región entre la nube y la superficie, la precipitación cae en forma de nieve, pero si la temperatura está por encima del punto de congelación las partículas de nieve caen en forma de lluvia. Si la precipitación cae en forma de lluvia a través de una capa de aire frío las gotas de lluvia se convertirán en granos de hielo. Este fenómeno es referido como aguanieve.

### 1.3.2 Tipos de precipitación

Se ha indicado la precipitación desde un punto de vista meteorológico, como agua en una de sus formas, que cae del aire y se deposita en la superficie de la Tierra. Por lo tanto, se puede hacer una distinción entre las formas de condensación que ocurren en la atmósfera y las que suceden en la superficie. [12]. En la siguiente tabla se puede observar diferentes intensidades de lluvia.

Tabla 1.3.2 1: Tipos de lluvia con sus características<sup>1</sup>

	<b>Lluvia débil</b>	<b>Lluvia moderada</b>	<b>Lluvia fuerte</b>	<b>Lluvia muy fuerte</b>	<b>Lluvia extrema</b>
intensidad [mm/h]	$10 \leq \text{lluvia}$	$10 \leq \text{lluvia} \leq 40$	$40 \leq \text{lluvia} \leq 70$	$70 \leq \text{lluvia} \leq 100$	$\text{Lluvia} > 100$
Descripción	Los charcos se forman lentamente en todo caso.	Los charcos se forman con bastante rapidez.	La lluvia que cae en las hojas y en los techos hace un ruido crepitante	La lluvia cae de forma que la pluviosidad es alta y las gotas son grandes. Viento intenso e incluye la posibilidad de que se precipite granizo.	Es una lluvia torrencial, puede causar estragos y generalmente se acompaña con vientos entre 25 Km/hora y hasta sobrepasa los 100 Km/hora en algunas ocasiones.

Datos obtenidos del CPM del MARN<sup>1</sup>

En términos estrictos, si la condensación sucede cerca de la superficie terrestre, el resultado no es una forma de precipitación. La lluvia, llovizna, nieve, granizo, lluvia gélida y neviscas, son todas formas de precipitación. Rocío, niebla y heladas, son formas de condensación del vapor de agua en la superficie. Por ende, aunque están mencionadas aquí según esta definición estos tres elementos no serían considerados como formas de precipitación. El tipo de precipitación recibida depende de la variación de temperatura por encima de la superficie.

La precipitación se divide en llovizna o lluvia, dependiendo del tamaño de las gotas de lluvia. Las gotas de llovizna son más pequeñas que 0.5 mm y en la lluvia mayor que 0.5.

#### **1.4 Pronóstico Meteorológico**

El pronóstico meteorológico básicamente implica predecir el estado futuro de la atmósfera utilizando la información y/o datos de las condiciones atmosféricas y climáticas de una amplia área que incide en una región. Para obtener esta información se dispone de una red de estaciones meteorológicas distribuidas alrededor del mundo. Alrededor de 10,000 estaciones terrestres, aeropuertos, barcos y boyas proveen información de superficie, adicionalmente datos en altitud son provistos por radiosondas, aeronaves, satélites y radares [13]. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) está constituida por un poco más de 175 naciones. La OMM es la organización responsable del intercambio de los datos meteorológicos y certifica que los procedimientos de las observaciones meteorológicas sean iguales entre naciones, esta es una tarea de mucha importancia, ya que las observaciones deben ser comparables [13].

Después que las observaciones meteorológicas son realizadas, los datos recolectados de muchas estaciones son enviados electrónicamente a los Centros Meteorológicos Mundiales localizados en Melbourne, Australia; Moscú, Rusia; y Washington, D.C., USA. Desde estos centros la información es transmitida al Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP: National Weather Environmental Service), una rama del Servicio Nacional Meteorológico (NWS: National Weather Service), localizado en Maryland cerca de Washington, D.C. Aquí se realiza el trabajo masivo de analizar los datos, preparar los mapas meteorológicos y gráficos, y así comienza la predicción meteorológica. Los gráficos, mapas y pronósticos producidos son enviados electrónicamente a las agencias de predicción meteorológicas [13].

En El Salvador esta información es recibida por el Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM) a través del uso de la data del modelo GFS (Global Forecast System: Sistema Global de Predicción). La data de este modelo es procesada utilizando el programa WINGRIDDS que permite al usuario visualizar mapas o campos de variables meteorológicas desplegados en mapas de contorno o en formato vectorial, según sea el más apropiado para una variable o parámetro en particular. Además, este programa permite al usuario extraer una variedad de información de numerosos parámetros de diagnóstico meteorológico de los campos de datos procesados.

También se cuenta con un modelo numérico mesoescalar de predicción del tiempo, este es el Modelo WRF: Weather Research and Forecasting (Modelo para la Investigación y Predicción del Tiempo). Este modelo está diseñado para la investigación atmosférica y para las necesidades operacionales de predicción del tiempo. El término mesoescalar indica que este modelo esta optimizado para el estudio de sistemas de tiempo atmosférico más pequeños que la escala sinóptica meteorológica, pero más grandes que la microescala y la escala de tormenta de los sistemas de nubes cúmulos. Sus dimensiones horizontales generalmente oscilan de cerca de 9 km a varios centenares de km. En la siguiente figura se puede observar un mapa generado por el modelo WRF de 15 km de resolución de malla, en este caso muestra la lluvia acumulada esperada para 6 horas.

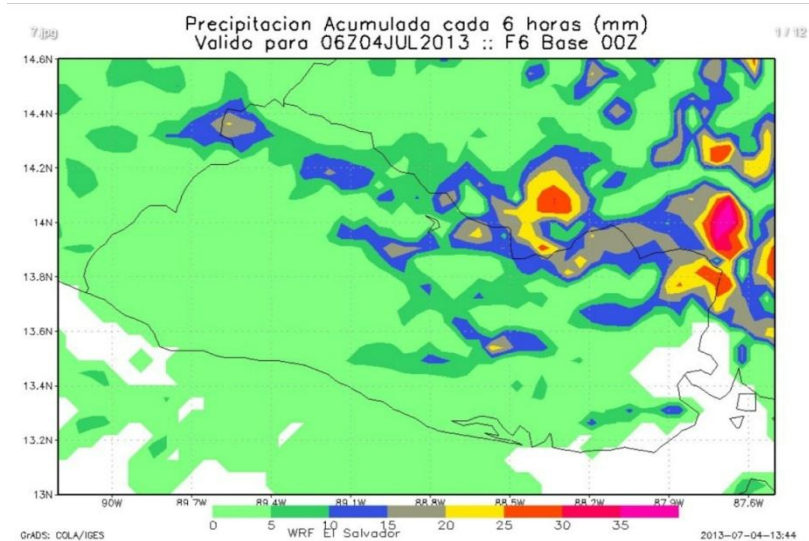
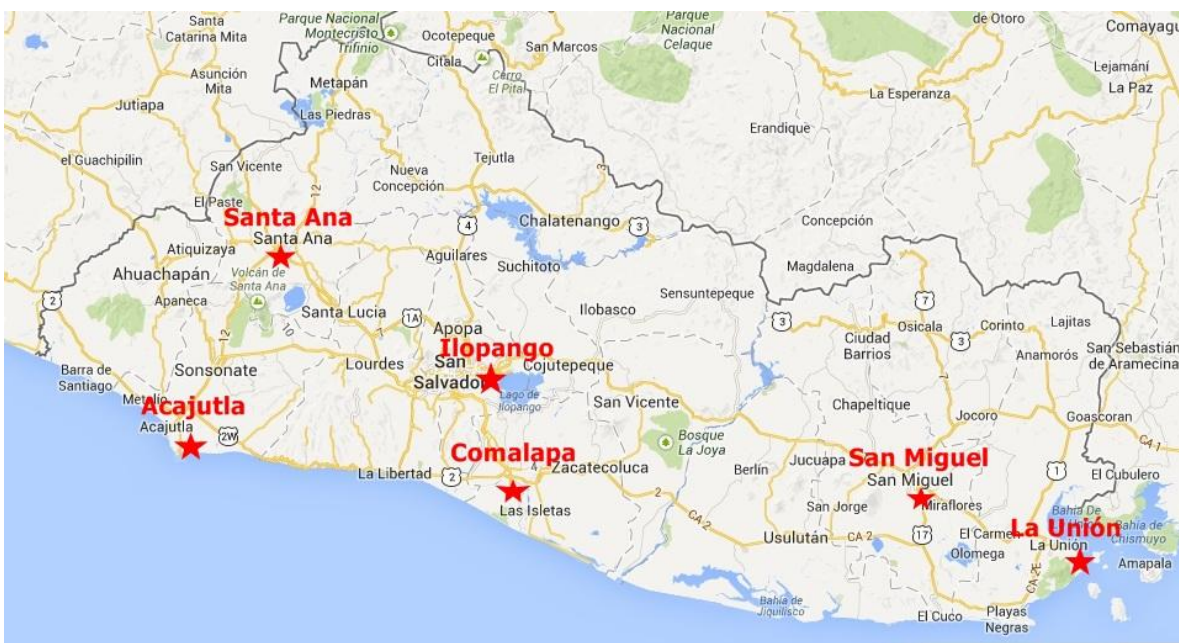


Figura 1.4 1: Mapa de lluvia acumulada esperada para 6 horas generado por el modelo WRF.

Además de la información provista por los modelos numéricos, el pronosticador cuenta con información de campo, generada por las estaciones aeronáuticas del país, observadores locales, estaciones telemétricas automáticas, imágenes de satélite e imágenes de radar. Con todas estas herramientas y su respectivo análisis e interpretación, el equipo de meteorólogos-pronosticadores del CPM elabora pronósticos del tiempo todos los días con validez de 24 y 48 horas. También realizan pronósticos marítimos-costeros con validez de 36 horas. En la figura 1.4.2 se puede observar las ubicaciones de las seis estaciones aeronáuticas con personal permanente con las que cuenta el país.



**Figura 1.4 2: Estaciones aeronáuticas con personal permanente del país: Santa Ana, Acajutla, Ilopango, Comalapa, San Miguel y La Unión.**

Las instalaciones donde se encuentran ubicadas las estaciones aeronáuticas de la figura anterior son:

- La Unión: Puerto CORSAIN (Corporación Salvadoreña de Inversiones). Código OACI (Organización de Aviación Civil Internacional): MSLU.
- San Miguel: Universidad de El Salvador, Facultad Multidisciplinaria Oriental. Código OACI: MSSM.
- Comalapa: Aeropuerto Internacional de El Salvador. Código OACI: MSLP.

- Ilopango: Aeropuerto Internacional de Ilopango. Código OACI: MSSS.
- Santa Ana: UNICAES (Universidad Católica de El Salvador). Código OACI: MSSA.
- Acajutla: Puerto de Acajutla. Código OACI: MSAC.

## 1.5 Monitoreo Meteorológico

El monitoreo meteorológico consiste en las actividades de monitoreo y vigilancia de los eventos atmosféricos en todo el país, así como de las condiciones regionales o de escala sinóptica y planetarias para evaluar posibles sistemas atmosféricos que tuvieran el potencial de afectar a El Salvador, tales como: depresiones, tormentas tropicales, huracanes, fenómenos El Niño y La Niña, frentes fríos, vientos Nortes acelerados, etc. La entidad gubernamental responsable de esta labor es la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

Estas actividades de monitoreo y vigilancia atmosférica se desarrollan utilizando una variedad de herramientas meteorológicas tales como imágenes satelitales visibles, infrarrojas, vapor de agua, con diferente área de cobertura y resolución, reportes METAR (sigla traducida del francés: **MÉT**éorologique **A**viation **R**égulière; en inglés: **MET**eorological **A**erodrome **R**eport) recibidos cada hora y elaborados en la red nacional de estaciones aeronáuticas, reportes de medidas de precipitación de lluvia efectuados por observadores meteorológicos voluntarios, imágenes de radar producidas por la red nacional de radares banda X, precipitación de lluvia y velocidad de los vientos medidas por la red nacional de estaciones automáticas telemétricas y el pronóstico del tiempo de muy corto plazo utilizando los modelos numéricos GFS y WRF.

### 1.5.1 Satélites meteorológicos

Las imágenes satelitales es una herramienta muy importante utilizada para el monitoreo y vigilancia atmosférica así como para el pronóstico del tiempo. Los satélites proveen imágenes muy valiosas de sistemas nubosos que complementan las observaciones realizadas desde tierra. Además ya que el agua cubre cerca del 70% de la superficie terrestre estas imágenes se vuelven muy valiosas ya que obtenemos información de estos sistemas nubosos o atmosféricos en vastas regiones donde no se pueden realizar observaciones meteorológicas. Antes que los satélites

meteorológicos estuvieran en uso, sistemas atmosféricos como: depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes, permanecían sin detectarse hasta que se encontraban peligrosamente cerca de áreas habitadas. Los habitantes de estas zonas se veían muy afectados debido al poco, nulo o tardío alertamiento y advertencias. En nuestros días los satélites localizan esos sistemas atmosféricos mientras aún se encuentran sobre el océano, a grandes distancias del continente, y esto permite rastrearlas y vigilar su trayectoria con mucha precisión y eficacia.

Existen dos tipos primarios de satélites meteorológicos en uso para la observación de sistemas nubosos. El primero son los *satélites geoestacionarios* (*geosynchronous satellites*), ellos orbitan el ecuador a la misma tasa de giros que la Tierra, por lo que permanecen a una distancia aproximada de 36,000 km (22,300 mi) de la Tierra, sobre un punto fijo sobre la superficie terrestre. Este posicionamiento permite el monitoreo continuo de una región específica (ver figura 1.5.1.1)

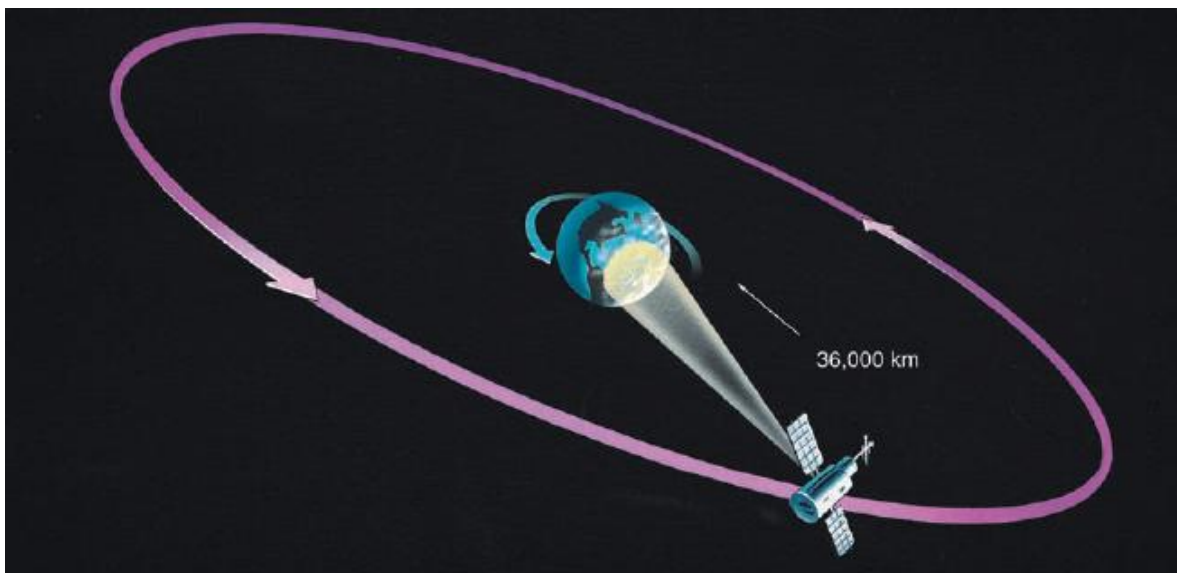


Figura 1.5.1 1: Satélites geoestacionarios. [13].

Los satélites geoestacionarios son también importantes porque usan un sistema de datos “en tiempo real”, esto significa que el satélite transmite los datos al sistema receptor en tierra tan pronto como la cámara toma la imagen. De esta manera imágenes sucesivas de nubes pueden ser colocadas en una animación de secuencia de imágenes para un tiempo determinado y mostrar el

movimiento de las nubes, su disipación o su desarrollo asociado a un sistema atmosférico y trayectoria. Las imágenes satélites usadas para nuestra región se obtienen en intervalos de 30 minutos y se pueden animar secuencias de hasta 16 imágenes (o más inclusive). Esta información es de gran ayuda para el meteorólogo de monitoreo y pronosticador para observar el progreso de los sistemas atmosféricos. La dirección del viento y su velocidad en varios niveles pueden ser estimadas monitoreando el movimiento de las nubes con un satélite geoestacionario a través de los diferentes tipos de dispositivos que éste posee.

El otro tipo primario de satélites meteorológicos son los *satélites de órbita polar*, que son casi paralelos a los meridianos terrestres. Estos satélites pasan cerca de las regiones polares norte y sur en cada revolución. A medida que la Tierra gira hacia el este debajo del satélite, en cada giro el satélite monitorea un área hacia el oeste del área previa (ver figura 1.5.1.2). Eventualmente el satélite cubre toda la superficie terrestre.

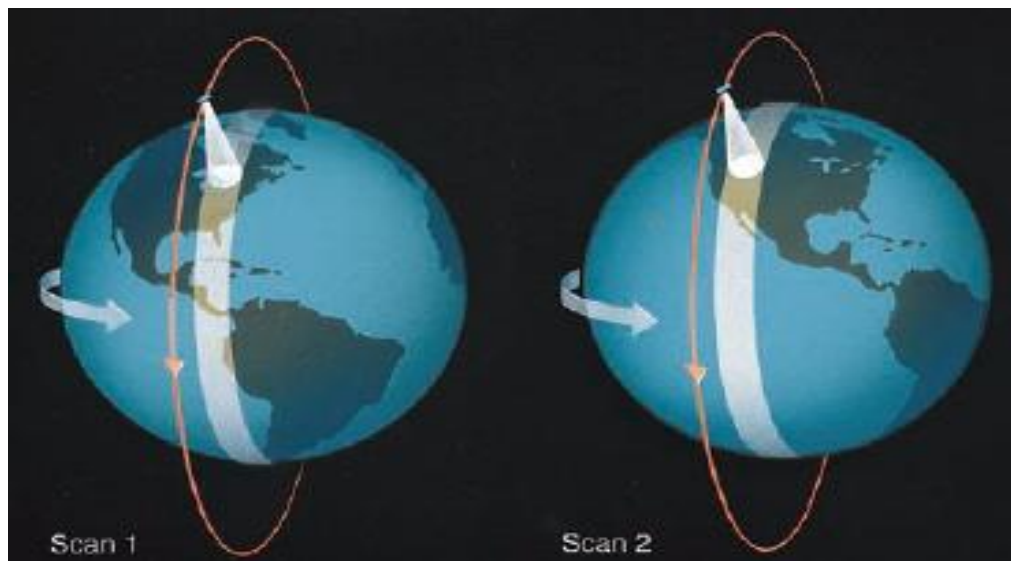


Figura 1.5.1 2: Satélites de órbita polar rastrean desde el norte hasta el sur de la Tierra [13]

Los satélites de órbita polar proveen imágenes claras de las regiones polares, donde las imágenes de los satélites geoestacionarios están distorsionadas por el ángulo al que el satélite ve la región. Los satélites de órbita polar circundan la Tierra a un altitud más baja que los estacionarios, cerca de 850 km (530 mi), estos satélites recorren una órbita polar completa en aproximadamente 1.5 horas, por lo que en un período de 24 horas realizan 14 órbitas alrededor del planeta generando

imágenes y datos del clima y el tiempo de toda la Tierra. Los satélites de órbita polar proveen dos imágenes diarias de cada región del planeta que orbitan, debido a esto solo se disponen de dos imágenes al día para el país.

La resolución de las imágenes que proveen los satélites de órbita polar es más alta que las que proveen los satélites geoestacionarios, debido a que estos se encuentran en una órbita más cercana a la Tierra que los geoestacionarios.

Los satélites de órbita polar proveen un amplio rango de productos de monitoreo ambiental y aplicaciones incluyendo análisis del tiempo y pronóstico, investigación climática y predicción, medidas de temperatura de la superficie oceánica, sondeo atmosférico de temperatura y humedad, investigación de dinámica oceánica, monitoreo de erupciones volcánicas, detección de incendios forestales, análisis de vegetación global, búsqueda y rescate y muchas otras aplicaciones (Fuente: NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration).

### **1.5.2 Imágenes Satelitales Visibles**

Las imágenes visibles muestran la luz del sol reflejada en las capas más altas de las nubes. Ya que las nubes con mayor grosor tienen mayor reflectividad que las nubes delgadas, éstas aparecen ligeramente más brillantes en una imagen satelital visible. Sin embargo, las nubes de las capas medias y bajas tienen casi la misma reflectividad que la de las capas altas por lo que es difícil distinguir entre ellas usando simplemente las imágenes de luz visible. Para hacer esta distinción son utilizadas las imágenes infrarrojas.

La figura 1.5.2.1 es un ejemplo de imagen satelital visible, en ésta se puede observar el huracán Mitch al noreste de Centro América, todas las nubes en la imagen aparecen casi de la tonalidad blanca. Sin embargo en una imagen satelital infrarroja se observaría en diferentes tonos de blancos o grises. Si a esto agregamos que en la actualidad las imágenes infrarrojas se presentan en escala de colores, la distinción de las diferentes capas de nubes es más fácil que en la imagen visible.

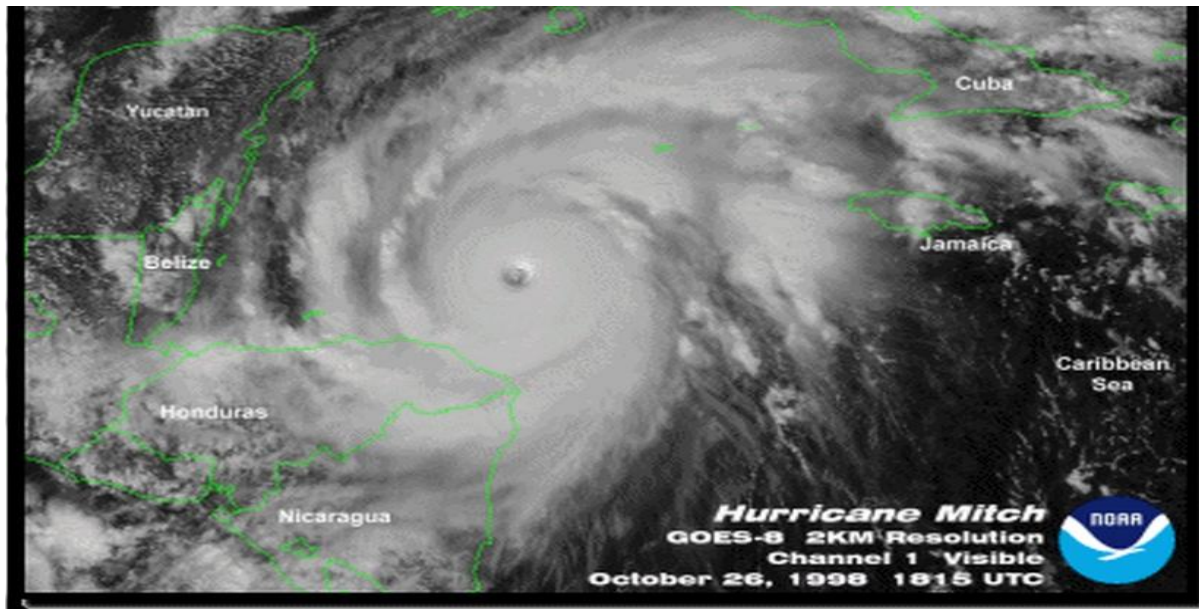


Figura 1.5.2 1: Imagen satelital visible del 26 de Octubre de 1998. Se puede observar el huracán Mitch al noreste de Centro América. Fuente: NOAA.

La DGOA cuenta con los siguientes recursos y fuentes para la obtención de imágenes satelitales: MCIDAS (Man computer Interactive Data Access System) desarrollado por la Universidad de Wisconsin-Madison Sistema RAMSDIS (Regional Advanced Meteorological Satellite Demonstration and Interpretation System) desarrollado por NWS (National Weather Service) y NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), servidor de imágenes de satélite de la NOAA, NASA (National Aeronautics and Space Administration) satellite imagery: imágenes de satélite de la NASA.

### 1.5.3 Imágenes Satelitales Infrarrojas

Los satélites contemporáneos utilizan dispositivos optoelectrónicos (espectrómetros) para poder observar las nubes durante el día y la noche, de lo contrario estaríamos restringidos sólo a las horas del día para realizar el monitoreo y vigilancia de la atmósfera. Los espectrómetros nos permiten observar las nubes detectando la radiación infrarroja que emana de ellas, los satélites anteriores utilizaban radiómetros (instrumentos para detectar y medir la intensidad de energía térmica radiante, en especial de rayos infrarrojos) para esta función. Estos dispositivos nos

permiten producir mejores imágenes de las superficies radiantes de las nubes porque no muestran la fuerte radiación de la luz visible [13].

Ya que los objetos calientes irradian mayor energía que los objetos fríos, las regiones con alta temperatura pueden hacerse aparecer negras en la imagen infrarroja (como océanos y continentes) y debido a que los topos de las nubes bajas, medias y altas son frías pero con diferentes temperaturas (los topos de las nubes bajas son más calientes que los topos de las nubes medias y los topos medios más que los altos) se puede distinguir entre diferentes capas de nubes en una imagen infrarroja (ver figura 1.5.3.1). Los colores se presentarán negros en océanos y continentes, y luego pasarán de grises oscuros para nubes bajas a tonalidades claras para nubes medias y blancas para las nubes más altas.

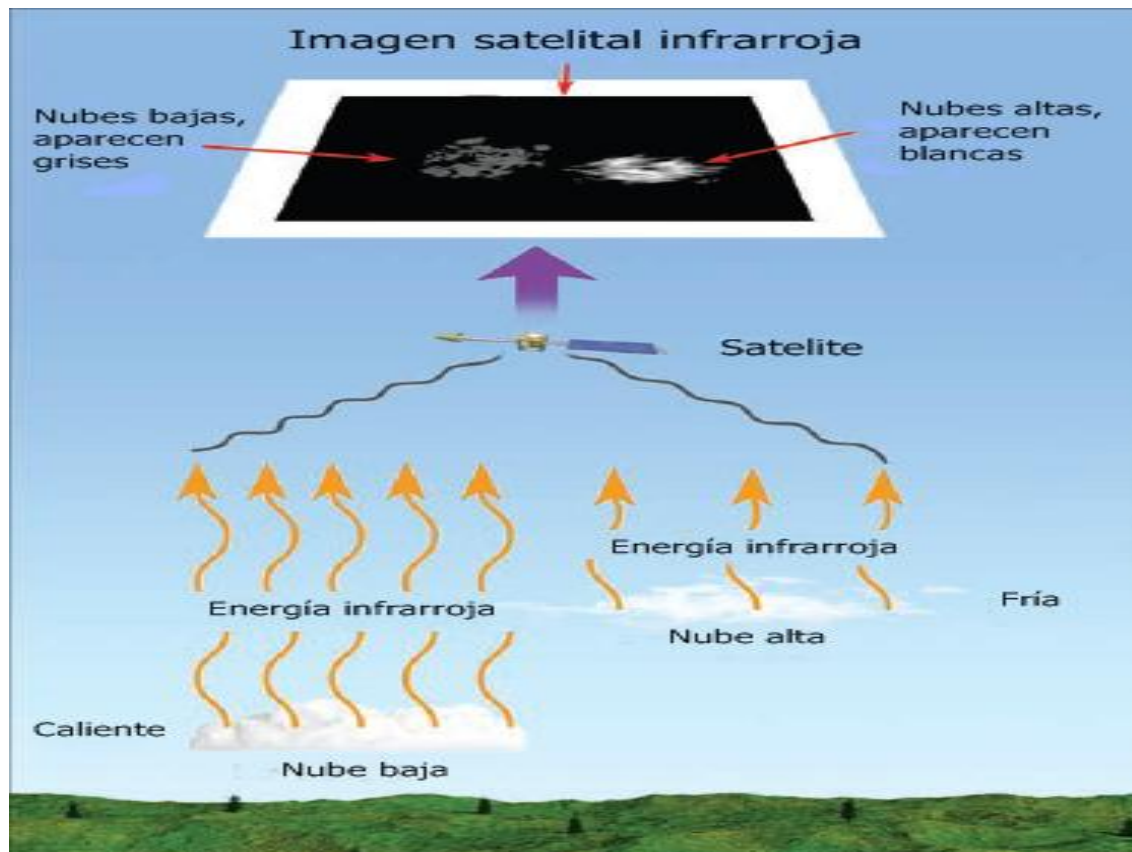


Figura 1.5.3 1: Una imagen de satélite infrarroja puede distinguir entre nubes bajas (más calientes) y nubes altas (más frías). Las nubes bajas aparecerán en la imagen de color gris y las altas de color blanco. [13]

En la actualidad se asigna una escala de colores a las imágenes infrarrojas en lugar de una escala de grises, de esta manera es mucho más fácil distinguir cada capa de nubes según su temperatura. Esta cualidad de las imágenes infrarrojas es de suma importancia para el meteorólogo que puede realizar un mejor análisis del sistema nuboso y prever sus consecuencias. En la figura 1.5.3.2 se muestra una imagen infrarroja del huracán Mitch del 26 Octubre de 1998 en el Océano Atlántico, se puede observar que a diferencia de la imagen visible (1.5.2.1) del mismo sistema, donde todas las nubes se miraban casi del mismo color (color blanco) en la imagen satelital infrarroja se pueden distinguir los diferentes colores de las nubes del sistema. Cerca del ojo del huracán se observa un área de color violeta y rojo que corresponden a las nubes más altas del sistema, seguido de anaranjado y amarillo que corresponden a nubes medias, y alrededor, colores azul, celeste y grises que corresponden a las nubes más bajas.

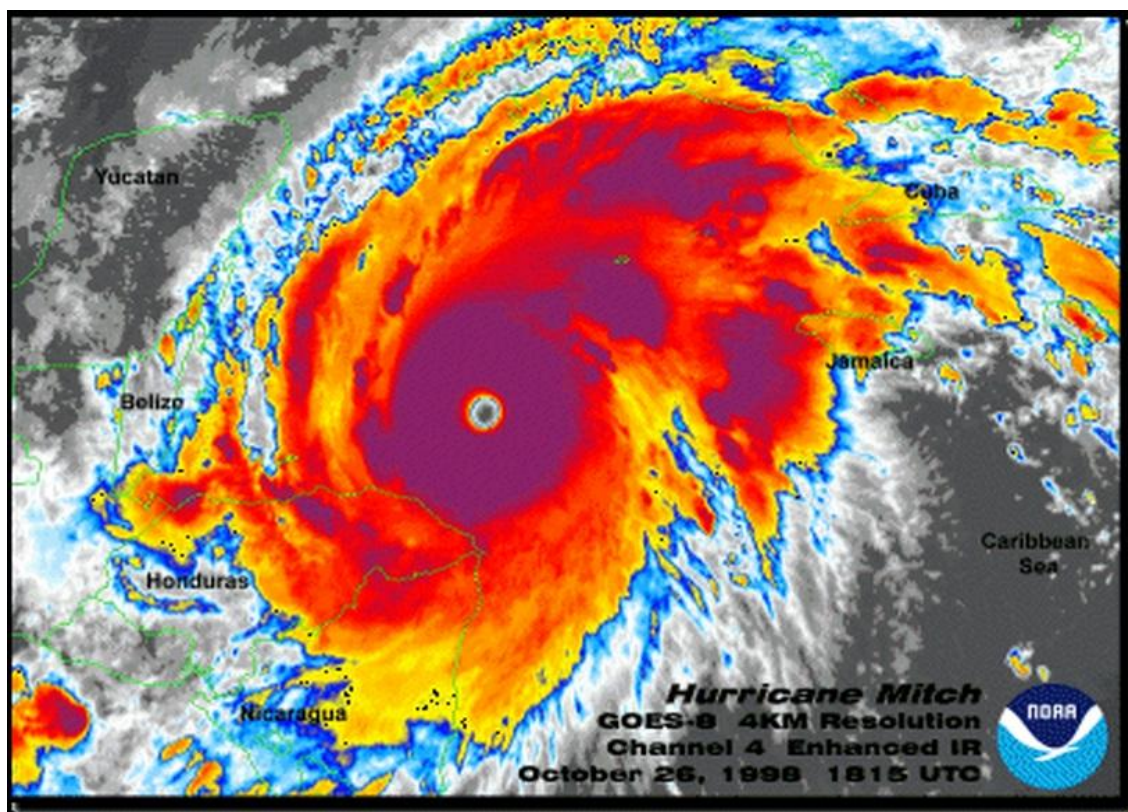


Figura 1.5.3 2: Imagen satelital infrarroja del 26 de Octubre de 1998 del Huracán Mitch. Fuente: NOAA.

#### 1.5.4 Imágenes Satelitales de Vapor de Agua

En regiones o en sistemas atmosféricos donde las nubes son muy escasas o no hay, es difícil observar el movimiento de estos sistemas y del aire mismo. Para ayudar con esta situación, los satélites estacionarios están equipados con sensores que detectan la radiación emitida por gases en la atmósfera como el vapor de agua. Estas imágenes pueden mostrarnos la distribución de vapor de agua en las capas medias y altas de la tropósfera. En la imagen 1.5.4.1 se muestra una imagen satelital de vapor de agua donde se puede observar la zona naranja (zona de aire seco) y zona de colores azul, blanco, etc (zona de aire húmedo).

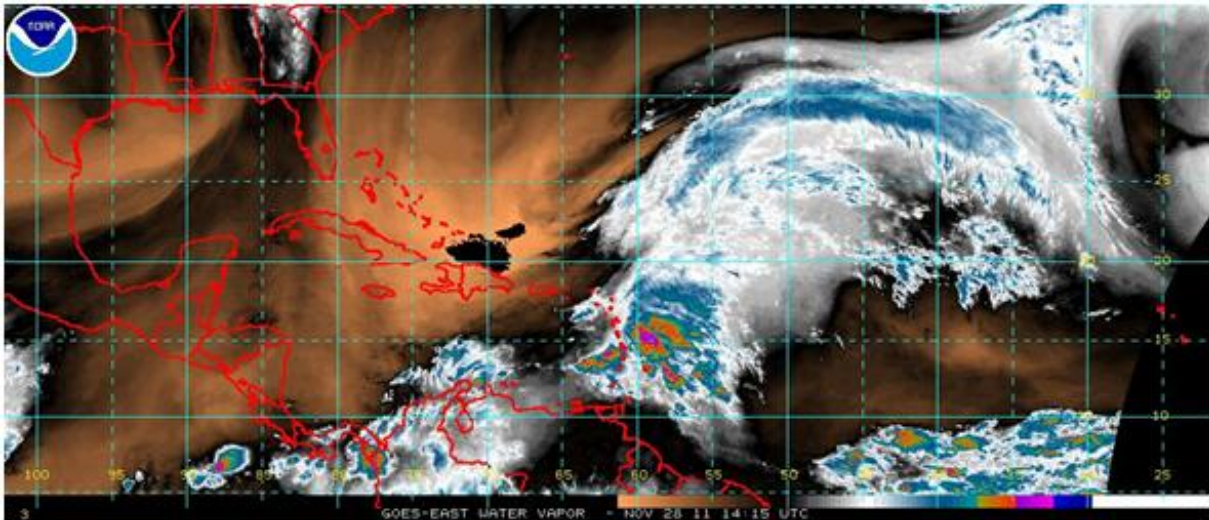


Figura 1.5.4 1: Imagen satelital de vapor de agua. Fuente: NOAA.

Para cada tipo de imagen (visible, infrarroja, vapor de agua) los satélites registran diferentes rangos de longitud de onda, estos son:

- Imágenes visibles: de 0.4 a 1.1  $\mu\text{m}$ .
- Imágenes de vapor de agua: de 5.7 a 7.1  $\mu\text{m}$ .
- Imágenes infrarrojas: de 10.5 a 12.5  $\mu\text{m}$ .

### 1.5.5 Sistema LAWR de El Salvador

El principio de funcionamiento de un radar meteorológico es el siguiente ver figura 1.5.5.1: se envía un pulso electromagnético generado por un magnetrón hacia el objetivo (en este caso las gotas de lluvia), este pulso interactúa con las gotas de lluvia (1) y retorna el haz electromagnético atenuado hacia el detector del radar (2); este haz de retorno es transformado de una señal analógica a digital, y mediante la aplicación de procesos de filtrado y tratamientos estadísticos, es interpretado como lluvia de cierta intensidad, si los valores de reflectividad de la señal de retorno son altos indica que la lluvia es de mayor intensidad y viceversa.

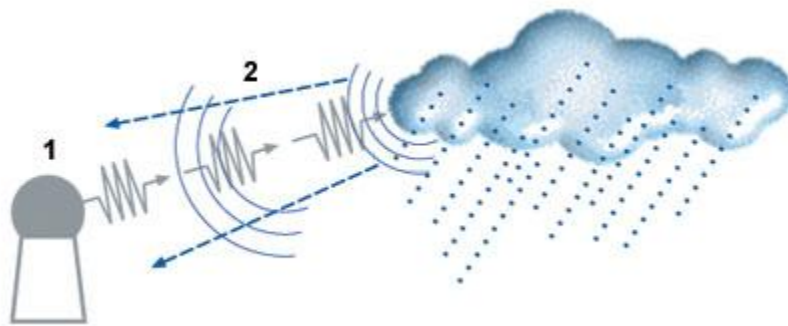


Figura 1.5.5 1: Esquema del principio básico del funcionamiento del radar, donde se observa la radiación reflejada por las gotas de lluvia.

En la figura siguiente se observa el proceso general de la producción de imágenes de radar:



Figura 1.5.5 2: Esquema del proceso general para la producción de imágenes de radar.

El Salvador cuenta con un sistema de 8 radares meteorológicos del tipo LAWR adquiridos por el MARN a través de la empresa DHI (Danish Hydraulic Institute); dichos radares se encuentran instalados en los siguientes sitios (ver figura 1.5.5.3):

- Santa Ana, ciudad de Santa Ana.
- Sonsonate, ciudad de Sonsonate.
- San Salvador, ciudad de San Salvador
- Chalatenango, La Laguna.
- La Paz, ciudad de Zacatecoluca.
- San Miguel, ciudad de San Miguel.
- Cabañas, ciudad Victoria.
- Usulután, Puerto Parada.



Figura 1.5.5.3. Ubicaciones de los radares LAWR de la red nacional.

De los 8 radares meteorológicos, 3 de ellos (Santa Ana, San Salvador y San Miguel) se encuentran en operación desde el año 2010; la segunda fase de 3 radares (Sonsonate, La Laguna

y Zacatecoluca) están en operación desde el año 2011. En el mes de octubre del año 2012 se instalaron 2 nuevos radares en Victoria (Cabañas) y Puerto Parada (Usulután).

Con los radares meteorológicos se puede estimar la intensidad de las lluvias, mediante el uso de una escala de colores, la cual clasifica las lluvias de acuerdo a la siguiente leyenda:

- Verde a celeste = lluvia débil
- Celeste a azul = lluvia moderada
- Azul a morado = lluvia fuerte
- Morado a Rojo = lluvia muy fuerte

Se ha colocado dos colores por cada intensidad de lluvia y colores de transición, ya que por lo general en una imagen de radar no se presentan colores individuales y siempre se trata de una composición de varios colores, por lo que la intensidad de lluvia de un área determinada presenta en la mayoría de las ocasiones más de un color; este se debe a la naturaleza variable de las lluvias en cuanto a su distribución, intensidad, duración, etc.



Figura 1.5.5 4: Escala de colores de intensidad de lluvia.

A continuación se muestran las fotografías de los sitios en donde se encuentran ubicados 6 de los 8 radares (LAWR) que conforman la red de radares meteorológicos (ver fig. 1.5.5.5).



Radar de Santa Ana



Radar de Sonsonate



Radar de La Laguna (Chalatenango)



Radar de San Salvador



Radar de Zacatecoluca

Radar de San Miguel

Figura 1.5.5 5: Fotografías de los sitios en donde se encuentran instalados 6 de los 8 radares meteorológicos nacionales.

### 1.5.6 Imágenes de radar del sistema LAWR de El Salvador

Se cuenta con imágenes de radar de dos coberturas diferentes: una de un radio de 60 km y otra de un radio de 120 km. Las imágenes pueden ser observadas ya sea como una sola imagen compuesta de la combinación de las imágenes individuales dadas por cada uno de los 8 radares meteorológicos, o se puede observar las imágenes individuales de cada uno de los radares; en ambos casos, siempre se puede elegir entre la imagen de radio de 60 km o de 120 km.

La imagen de 60 km de radio tiene una resolución de 240 x 240 píxeles y cada píxel tiene una dimensión de 500 x 500 m. La imagen de 120 km de radio tiene una resolución de 240 x 240 píxeles y cada píxel tiene una dimensión de 1000 x 1000 m. Los píxeles que componen las imágenes de radar reciben un valor de reflectividad en decibeles que permite asignarles un color de intensidad de lluvia, haciendo esto con cada píxel se realiza la composición de una imagen completa de radar. Este proceso se realiza continuamente para obtener una imagen de radar cada 5 minutos y poder realizar monitoreo en tiempo real. El MARN cuenta con un sitio web para el acceso público de estas imágenes, se pueden observar una secuencia de hasta 15 imágenes de radar con un intervalo de 5 minutos entre cada una, siendo la última imagen la del tiempo actual y la primera imagen la de 1 hora con 15 minutos antes. Esto permite monitorear y vigilar a los sistemas atmosféricos que generan lluvias para analizar su desarrollo, intensidad y trayectoria.

Con los radares se puede hacer un seguimiento del desplazamiento de las lluvias, y su posicionamiento respecto a las imágenes de satélite. Se debe comparar en todo momento la correlación entre las imágenes de radar, las de satélite y lo mostrado por los reportes aeronáuticos. Estas actividades y procesos se realizan en el DGOA, en la Gerencia de Meteorología, 24 horas al día y durante todos los días del año. Para realizar estas actividades se cuenta con protocolos de procedimientos, actuación y comunicación, haciendo uso de diferentes fuentes y recursos tanto para las imágenes satelitales, reportes aeronáuticos, modelos meteorológicos, y estaciones telemétricas automáticas.

La siguiente figura es una imagen de radar que muestra los diferentes colores (intensidad de lluvia) que pueden presentarse durante las lluvias. Los colores indican la intensidad de la lluvia según la escala de colores que se explicó anteriormente. Se puede observar que las lluvias en la imagen corresponden a una intensidad de moderada a fuerte.

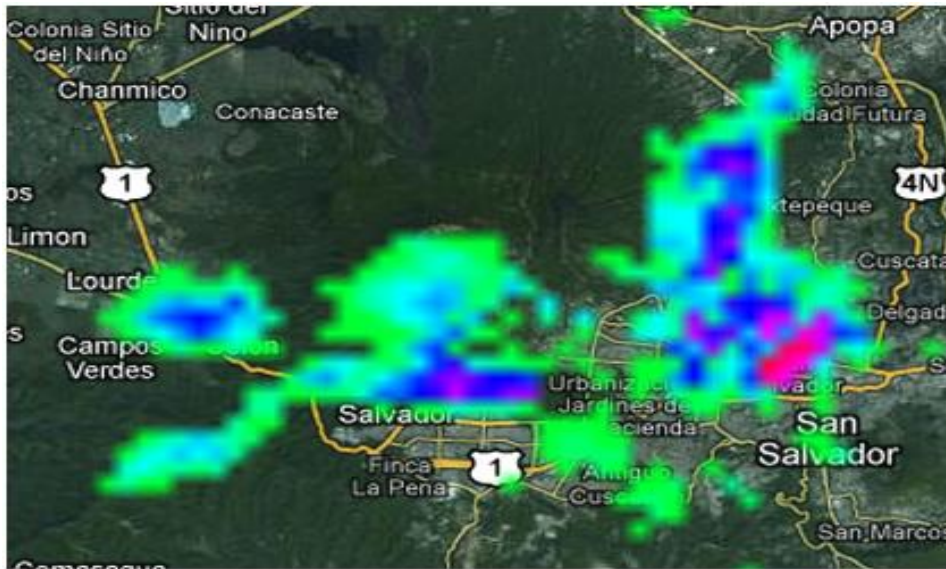


Figura 1.5.6 1: Imagen de radar del sistema LAWR.

### 1.5.7 Reportes METAR

METAR (sigla traducida del francés: **MÉT**éorologique **Aviation R**égulière; en inglés: **METE**orological **Aerodrome R**eport) es un estándar internacional del formato del código utilizado para emitir informes de las observaciones meteorológicas en los aeródromos; dichos informes son realizados periódicamente, a intervalos regulares. Son usados por los meteorólogos, para ayudarse en los pronósticos del tiempo, y fundamentalmente por los pilotos de las aeronaves para conocer el tiempo atmosférico de los aeropuertos de destino y actuar en consecuencia con ellos. Estos se emiten cada hora y muestran las condiciones atmosféricas observadas sobre la estación meteorológica y sus alrededores en un radio de 10 km., tales como el tipo de nubosidad presente, la velocidad y dirección del viento, fenómenos meteorológicos afectando la estación, etc.

La estructura básica de un METAR se muestra con la siguiente clave, que posee 9 grupos de información (ordenados de izquierda a derecha, del grupo 1 a 9 para su explicación):

Tabla 1.5.7 1: Estructura básica de un METAR.

METAR	Código de la estación	Fecha y Hora	Viento Dirección/velocidad	Visibilidad horizontal	Fenómenos del tiempo presente	Tipos de Nubes	Temperatura – Ambiente/rocío	Presión
-------	-----------------------	--------------	-------------------------------	------------------------	-------------------------------	----------------	------------------------------	---------

- 1) El reporte debe iniciar con el código METAR, para diferenciarlo de otros reportes producidos por la estación.
- 2) Luego le sigue la identificación del código OACI asignado para la estación aeronáutica que produce el reporte. En el caso de El Salvador, se tienen las siguientes estaciones meteorológicas: *Santa Ana – El Palmar*, código *MSSA*; *Puerto de Acajutla*, código *MSAC*; *Aeropuerto de San Salvador – Ilopango*, código *MSSS*; *Aeropuerto Internacional de El Salvador (Comalapa)*, código *MSLP*; *San Miguel – El Papalón*, código *MSSM*; *La Unión – Puerto CORSAIN*, código *MSLU*.
- 3) Se indica la fecha y la hora en la que se elaboró el reporte, primero los dígitos correspondientes al día (2 dígitos) y la hora expresada en formato internacional UTC (Universal Time Coordinated en inglés, o Tiempo Universal Coordinado); en El Salvador, la hora UTC se obtiene sumándole 6 horas a la hora local. Finalmente, se agrega al final de la hora la letra Z mayúscula, para designar que se trata de hora en formato UTC.
- 4) Para el caso del viento, primero se codifica la dirección de donde viene (3 dígitos) y la magnitud de su valor (2 dígitos) y la abreviatura para la unidad de medida para el viento, la cual es generalmente los nudos, que se abrevia KT (knots). La dirección del viento se mide en sentido horario, asignando la posición correspondiente a los 90 grados al este, 180 al sur, 270 al oeste y 360 al norte, según se muestra en la figura adjunta.

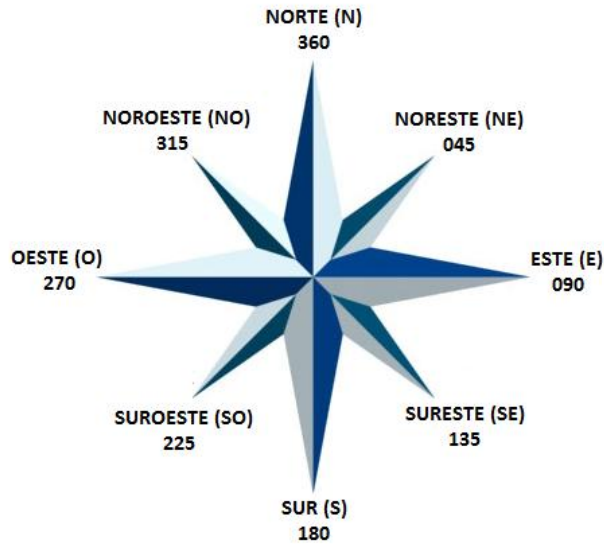


Figura 1.5.7 1: Rosa de los vientos, mostrando la numeración en grados asignada a las direcciones.

- 5) Grupo correspondiente a la visibilidad horizontal expresada en metros.
- 6) Grupo que describe los fenómenos atmosféricos presentes en la estación, al momento de elaborar el reporte METAR, como por ejemplo los siguientes: SH, *Showers* (Chubascos); HZ, *Haze* (bruma); DZ, *Drizzle* (Llovizna); RA, *Rain* (Lluvia); GR, *Hail* (Granizo); TS, *Thunderstorm* (Tormenta eléctrica), etc.; y los prefijos “-“ (débil); “+” (severo); VC, *Vicinity* (en las proximidades), etc.
- 7) Grupo de nubes, el cual describe la distribución y la altura a la que se encuentran las diferentes capas, de acuerdo a la siguiente codificación: FEW (escasas), SCT (dispersas), BKN (fragmentadas), OVC (cubierto); también, pueden mostrarse nubes de interés especial, principalmente para la identificación de tormentas severas: CB (Cumulonimbos), TCU (Torrecúmulos).
- 8) Grupo correspondiente a las temperaturas seca y húmeda.
- 9) Grupo correspondiente a las presiones barométrica y de altímetro.

La información contenida en estos reportes es utilizada operativamente en el CPM de la Gerencia de Meteorología de la DGOA para comparar las condiciones observadas en superficie con las imágenes de radar y de satélite en las áreas o zonas cercanas a las estaciones meteorológicas. La

dificultad que tienen estos informes es la amplitud del intervalo entre un reporte y otro (el cual es de 1 hora), por lo que se debe tener presente que funcionan como una fotografía de las condiciones mostradas a cada hora (del mismo modo que para el caso de las imágenes de satélite).

### 1.5.8 Estaciones Telemétricas

Se cuenta con una red de estaciones automáticas telemétricas, con transmisión satelital en tiempo real hacia San Salvador, las cuales monitorean variables hidrológicas y meteorológicas tales como la precipitación acumulada (PC), niveles de los ríos, velocidad del viento, presión barométrica, etc.; en algunos casos y dependiendo de la naturaleza y fin de la estación telemétrica instalada, sólo se cuenta con el registro de al menos una variable generalmente el nivel del río o la precipitación acumulada.

Esta red de estaciones automáticas telemétricas consta de 97 en total, de las cuales 35 son pluviométricas, 33 son hidrométricas, 28 son meteorológicas y 1 es mareográfica.

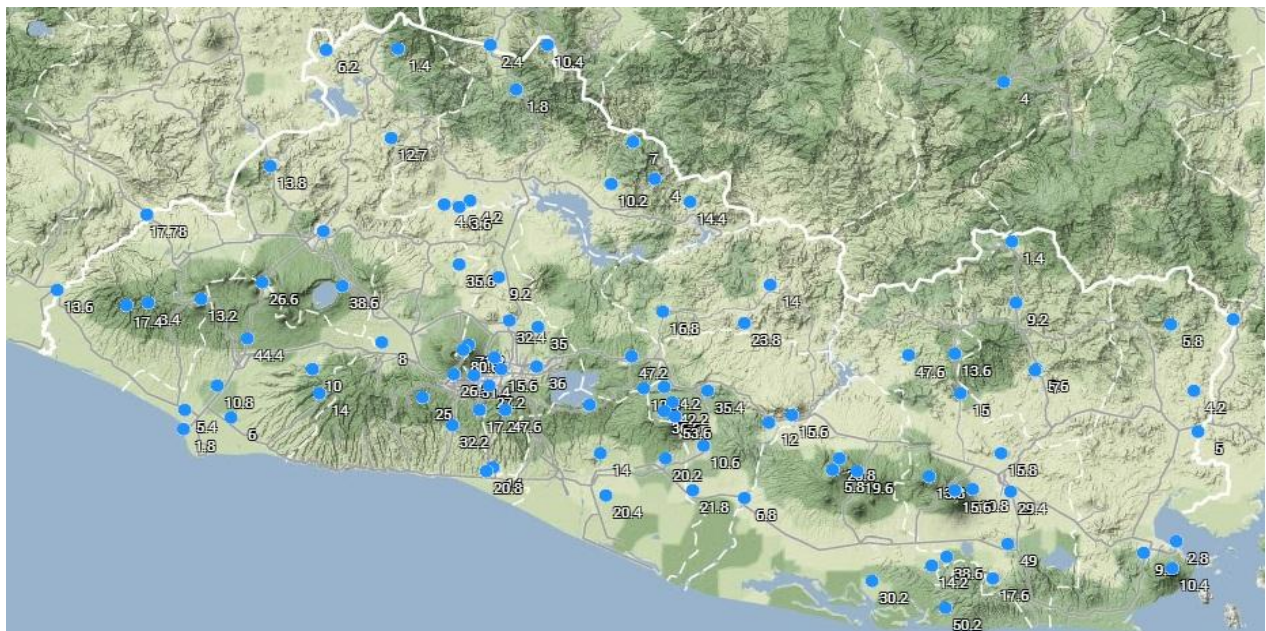


Figura 1.5.8 1: Mapa con la ubicación de la red de estaciones telemétricas automáticas de El Salvador.

Los datos proporcionados por las estaciones telemétricas, específicamente los relacionados con la lluvia, como es la precipitación acumulada (PC), sirven para comparar con los colores indicados por las imágenes de radar, para estimar la intensidad de la lluvia de manera cuantitativa, y así verificar el nivel de vulnerabilidad que pueden presentar ciertas zonas respecto

a las lluvias, las cuales son primordialmente las zonas urbanizadas. Se considera que una tasa de precipitación acumulada de 1 mm/min se puede denominar como lluvia intensa para ciertas zonas, mientras que la mitad de ese valor correspondería para lluvia moderada; este valor puede variar, dependiendo la situación presente (como por ejemplo, cuando los suelos se encuentran saturados, zonas consideradas de alta vulnerabilidad, etc.), por lo que siempre debe de vigilarse este umbral y adaptarlo según corresponda.

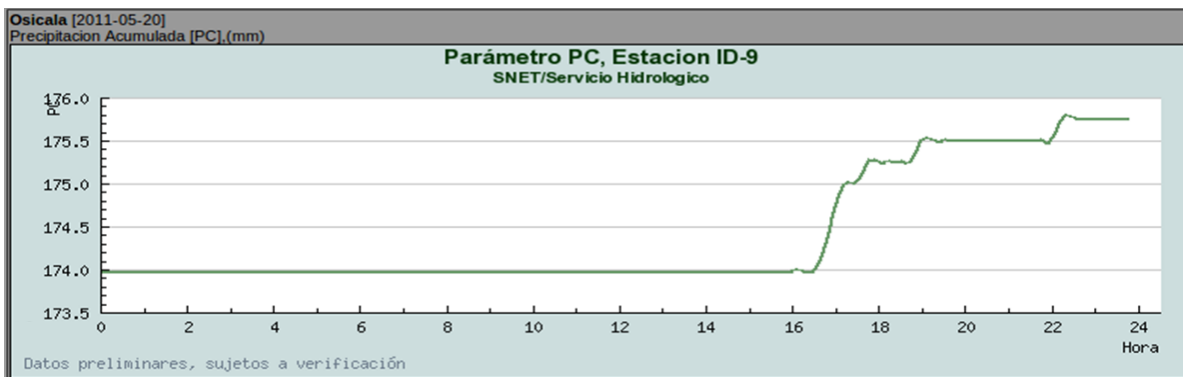


Figura 1.5.8 2: Registro gráfico de la precipitación acumulada de una estación telemétrica.

En la figura superior se muestra la gráfica de la lluvia acumulada registrada por una estación telemétrica. En el eje horizontal se tiene una escala en horas para un período de 24 horas, y en el eje vertical se tiene la lluvia acumulada en milímetros. Además, de la gráfica se tiene acceso a los datos en forma de tabla.

Los períodos de medición de los instrumentos que conforman las redes telemétricas son a intervalos de 5, 10, 15 e inclusive hasta 30 min, dependiendo de la zona y de los equipos instalados en el sitio de observación; generalmente, para la precipitación acumulada se pueden obtener registros en intervalos temporales de 15 ó 10 min en promedio para la mayoría de estaciones, mientras que algunas pueden reducir ese intervalo hasta 5 min para mediciones consecutivas en presencia de lluvias de intensidad significativa.

## 1.6 Sistema de Alerta Temprana (SAT)

Un sistema de alerta temprana conocido como SAT, es un conjunto de procedimientos, actores, instrumentos e información técnica o común, a través de los cuales se monitorea y vigila una amenaza o evento adverso, natural o humano, de carácter previsible para producir una alerta a las autoridades competentes y población en general con el mayor tiempo de anticipación posible. Se recolectan y procesan datos e información, ofreciendo pronósticos o predicciones temporales sobre la evolución del evento y posibles efectos. La importancia de un SAT radica en que permite conocer anticipadamente y con cierto nivel de certeza, en que tiempo y espacio, una amenaza o evento adverso de tipo natural o generado por la actividad humana puede desencadenar situaciones potencialmente peligrosas tanto para toda la población como para sus bienes materiales. [14]

El objetivo fundamental de un SAT es reducir o evitar las pérdidas de vidas humanas, percances de salud o lesiones, daños materiales y al ambiente, mediante la aplicación de medidas de Protección Civil, mitigación y reducción de riesgos. Entre las actividades de un SAT están: monitorear y dar seguimiento permanente a los fenómenos climáticos, emitir oportunamente avisos y/o alertas, sugerir medidas de prevención y mitigación, facilitar la información técnica a los organismos gubernamentales de Protección Civil para la toma de decisiones.

Para el diseño e implementación de un SAT se debe tener en cuenta una serie de elementos y de estructuras sectoriales e institucionales, además de otros componentes que determinan su aplicación y eficacia. Algunas organizaciones internacionales identifican cuatro elementos fundamentales que deben ser tomados en cuenta para la creación de un SAT:

- *Existencia y conocimiento de la amenaza y el riesgo:*  
Se debe identificar las amenazas y tener conocimiento de los riesgos, o eventos potencialmente peligrosos que puedan afectar a las poblaciones, infraestructuras y recursos expuestos al impacto de dichos fenómenos.
- *Respaldo técnico e institucional:*  
Se debe contar con el respaldo de instituciones científico-técnicas, y aquellas responsables de la toma de decisiones.
- *Difusión y comunicación:*

La difusión y comunicación de la información es un elemento crucial en un SAT, para motivar y concientizar a los habitantes y a sus autoridades, sobre la importancia del conocimiento de los riesgos, amenazas, vulnerabilidades, planes de emergencia, medidas de prevención y reducción de riesgos, etc-

- *Capacidad de respuesta:*

Es necesario contar con la participación directa de las comunidades, las cuales deben estar organizadas y preparadas con sus planes de respuesta debidamente actualizados para actuar en caso de emergencia.

Como se mencionó anteriormente un SAT puede ser clasificado según el tipo de amenaza que enfrenta: natural o humana. Por ejemplo algunas de las amenazas naturales en las que se aplican los SAT son: las inundaciones, deslizamientos de tierra, huracanes, lluvias de rápido desarrollo y fuerte intensidad, erupciones volcánicas, tsunamis, incendios forestales, fenómeno del Niño y la Niña, entre otros. Además hoy en día se pueden clasificar dos tipos de SAT según sus operadores: *SATs Centralizados*, operados por los servicios u organismos nacionales, y *SATs Comunitarios*, operados por las comunidades. El SAT Centralizado es un sistema que utiliza recursos tecnológicos que requieren conocimiento técnico y científico para realizar la observación y monitoreo de la amenaza, y la elaboración de pronósticos, alertas e informes técnicos de la misma. El SAT Comunitario se caracteriza por el uso de equipo de bajo costo y de fácil manejo operados por miembros de las comunidades, tanto en los componentes de la observación y monitoreo de la amenaza como en la comunicación y difusión de las alertas. Es preferible que ambos tipos de SATs estén muy bien concatenados para la mejor respuesta de la población antes las diversas amenazas.

En este trabajo se elaborará un SAT para monitorear y vigilar una amenaza de tipo natural como son los sistemas atmosféricos que producen lluvias de diferentes intensidades, distribuciones espaciales y temporales en El Salvador, a través de la red de radares del sistema LAWR; pero sobre todo aquellas lluvias de rápido desarrollo, de moderada a fuerte intensidad y/o persistentes. Además será un SAT centralizado operado desde el DGOA pero que estará muy bien vinculado hacia diferentes niveles (nacional, departamental, municipal y local) a través de la comunicación con Protección Civil, autoridades públicas y ministeriales, redes sociales y voluntarios locales, entre otros.

## 2 Metodología

Para la realización de esta investigación se utilizó equipo informático y meteorológico brindado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales los cuales se detallan a continuación:

### **Equipo**

Computadora

Red Telemétrica

Radar banda X LAWR de San Salvador

Datos P00 (datos encriptados de salida del equipo de cada radar)

### **Software**

Microsoft Excell 2010

App Lawr Tool para extracción de valores de reflectividad

Microsoft Word 2010

MathLab

### **2.1 Componentes del sistema LAWR**

Los radares meteorológicos de área local FURUNO LAWR instalados en El Salvador están basados en el uso de señal de banda X. La información que estos facilitan hace una mejora en el monitoreo de la atmósfera; en resumen los radares son una herramienta más eficaz en la vigilancia de eventos de lluvia y alerta temprana.

El método a emplear en esta investigación será enfocado al radar del área metropolitana de San Salvador instalado en el edificio N°1 del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Dentro de la investigación se aplicará la ecuación de Marshal-Palmer para la estimación de intensidad de lluvia por medio de datos de reflectividad del radar, además, se logrará observar las ventajas y limitantes en el uso del radar en un rango de 20 km.

El rango típico del radar para pronósticos de muy corto plazo es 60 km, pero para uso de calibración es recomendable utilizar un rango menor para la estimación de los datos de precipitación. El sistema LAWR está basado en un radar estándar marino FURUNO banda X FAR-2127 modificado para el control remoto y dos computadoras que manejan el procesamiento

avanzado de señales y la comunicación con el mundo exterior. El diseño del sistema y de los componentes incluidos se describe en la Figura 2.1.1.

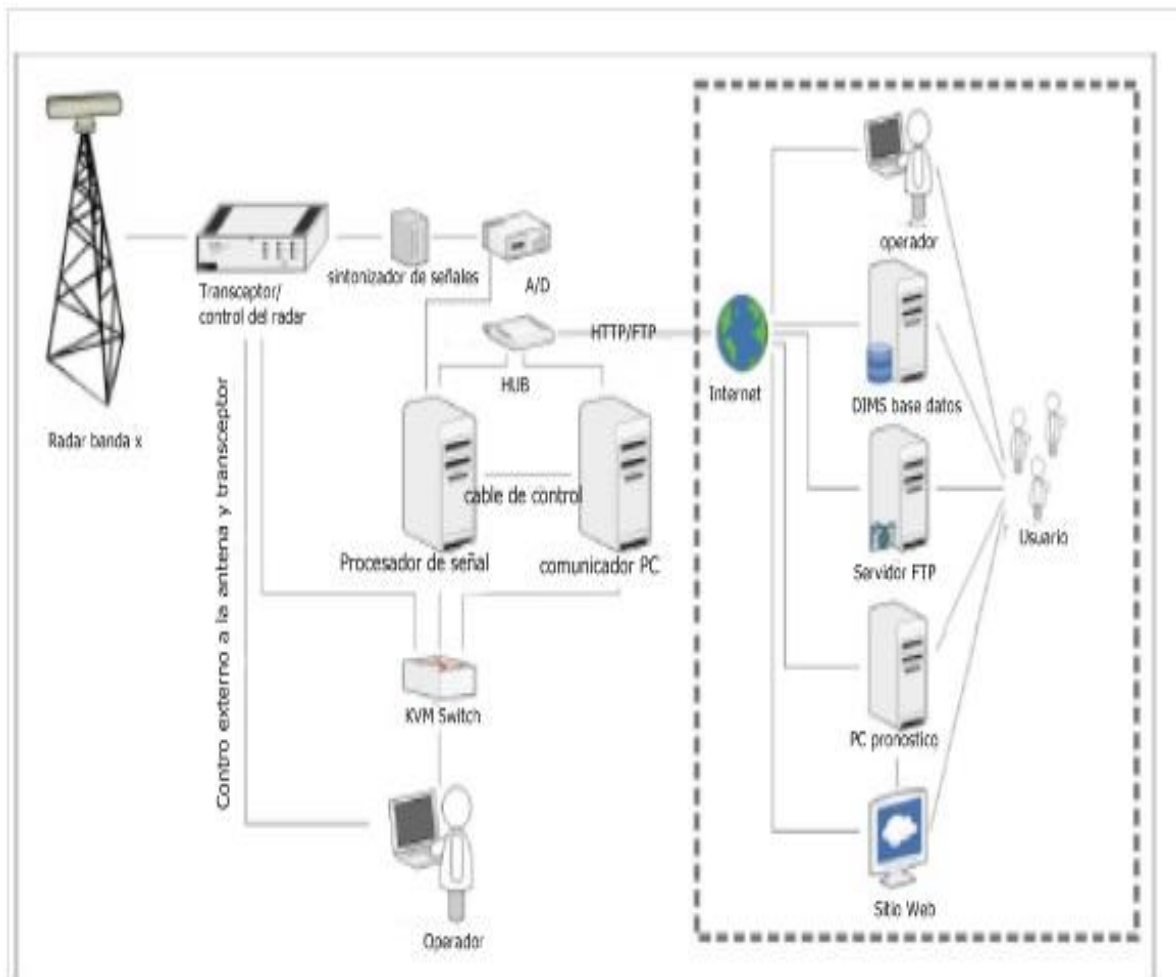


Figura 2.1.1: Diseño de un sistema de radar de área local. Fuente: DHI.

Los elementos contenidos en el área punteada son opcionales y todos requieren una conexión a internet. El radar es modificado al instalarse una tarjeta de control que permite a al PC comunicador operar los controles del radar. La señal del radar es generada por un magnetrón, el cual necesita ser remplazado cada 8 meses, éste está localizado en la unidad de la antena (ver fig. 2.1.2)



Figura 2.1.2: Fotografía que muestra la ubicación del magnetrón en el transceptor.

Las especificaciones técnicas del radar son mostradas en la tabla 2.1.1

Tabla 2.1.1: Especificaciones técnicas del radar LAWR, resolución espacial y temporal

Parámetro	LAWR (FURUNO FAR2127)
Potencia Pico	25kW*
Banda	X-Band
Frecuencia	9.41 GHz $\pm$ 30MHz
Longitud de onda	3.2cm
Longitud de Pulso	0.8-1.2 $\mu$ s
Bin Length (Longitud de muestra)	120m
Antena	2.5m
Receptor	Receptor logarítmico
Angulo de apertura vertical	$\pm$ 10°
Angulo de apertura horizontal	0.95°

Muestras por rotación	360
Rango/Pronostico y calibración	60/20km
Resolución Espacial	500x500 m (rango 60km) 250x250 m (rango 30km) 300x300 m (rango 15km) ** 100x100 m (rango 15km) **
Resolución Temporal	1 o 5 min
Estrategia de Escaneo	Una sola capa y escaneo continuo

\* La potencia pico efectiva del haz se establece como 12.5 kW debido a que la otra mitad del haz se pierde en el filtro del eco terrestre.\*\*No usados en este estudio

El área de muestreo de un LAWR es circular, como se ilustra en la Figura 2.1.3, donde se describe la trayectoria de un pulso. El radar está en superposición de la zona de muestreo con una rejilla, donde el área dentro de una celda de la cuadrícula está representada por un valor de la muestra. Las células de red se denominan píxeles. El tamaño de píxel depende de la resolución que se ha elegido; Tabla 2.1.1 para posibles resoluciones y tamaños de píxeles asociados.

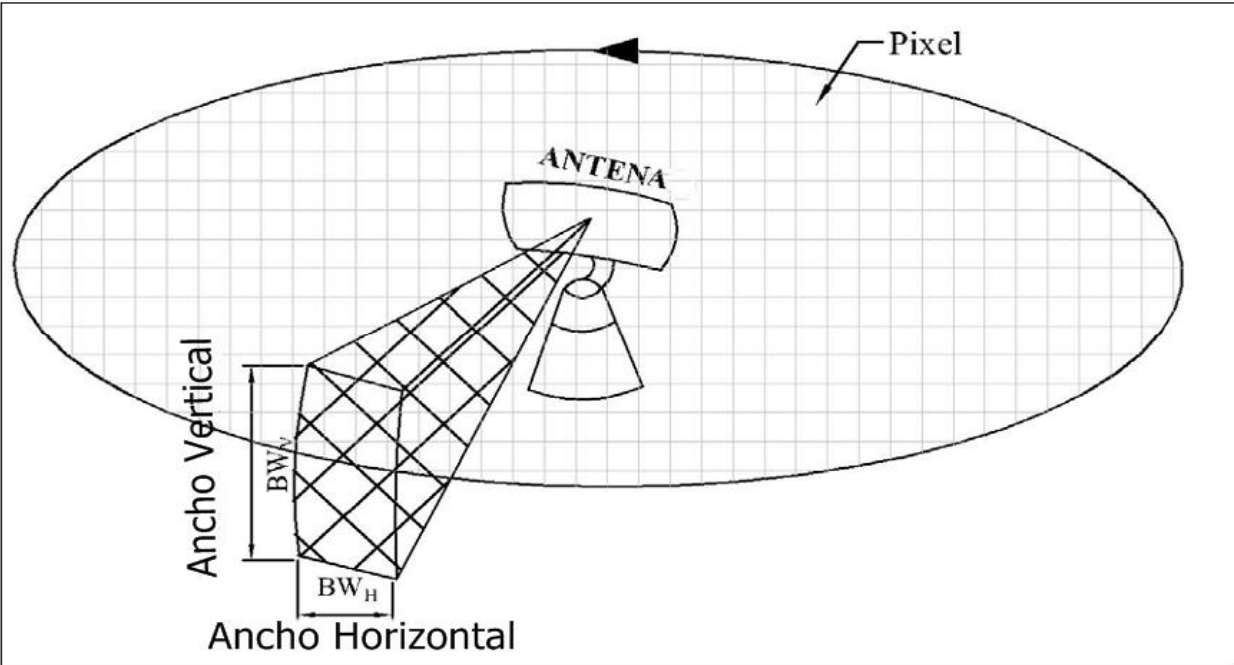


Figura 2.1.3: Esquema de la distribución del haz donde el círculo describe cómo toma los datos el LAWR en el plano horizontal y en el plano vertical.

La altura del haz vertical es más grande para los LAWR en comparación a los radares meteorológicos doppler, ya que a menudo tienen un ángulo de apertura vertical de unos pocos grados, el cual es pequeño en comparación con el  $\pm 10^\circ$  perteneciente al LAWR. La razón por la cual el ángulo de apertura de  $-10^\circ$  no es utilizado, es debido a que el rayo golpea el suelo muy rápidamente, y por lo tanto sólo el ángulo de  $+10^\circ$  es utilizado para la estimación de precipitación.

El haz del radar se hace más ancho en ambas direcciones vertical y horizontal con el aumento de rango de distancia como se ilustra en la Figura 2.1.3. El tamaño del haz depende del ángulo de apertura vertical y horizontal del radar y el rango.

## 2.2 Método de Calibración.

Para calibrar un radar para la detección y estimación de intensidad de lluvia fue necesario analizar la relación que existe entre la potencia de la señal transmitida desde la antena del radar y su potencia de retorno:

$$Pr = \left( \frac{\pi^3 P_t g^2 \theta \phi h}{1024 \lambda^2 Ln(2)} \right) \frac{|K|^2 z}{r^2} \quad (2)$$

Donde

Pr: Potencia promedio interceptada por la antena del radar [mW]

P<sub>t</sub>: Potencia en el tiempo de transmisión [mW]

g: Ganancia de la antena

θ: Ancho horizontal del haz [radianes]

φ: Ancho vertical del haz [radianes]

h: Longitud del pulso [μs]

K: Índice de refracción (0.93 para partículas de agua)

Z: factor de reflectividad [mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>]

λ: Longitud de onda del haz [m]

r: Rango, distancia desde el radar al blanco [m]

Normalmente la ganancia esta en decibeles, además P<sub>t</sub> describe la potencia transmitida desde el radar. El sistema del radar LAWR transmite una potencia de 25kW en el pulso, de forma que la señal del radar se verá afecta por algunos tipos de atenuación. En la ecuación 2 se introduce una constante *l*, la cual describe que fracción de la señal se perderá, así se obtendrá:

$$Pr = \left( \frac{\pi^3 P_t g^2 \theta \phi h}{1024 \lambda^2 Ln(2)} \right) \frac{|K|^2 l z}{r^2} \quad (3)$$

La mayoría de los parámetros de esta ecuación son constantes, dados por el fabricante, juntos formarán la constante del radar (C<sub>radar</sub>). De esta manera fue posible encontrar una forma de relacionar la potencia de retorno promedio y la reflectividad (z) que registro el radar mediante la siguiente ecuación:

$$z = C_{radar} (Pr) r^2 \quad (4)$$

Se utilizó la herramienta de Google Earth para generar perfiles de direcciones a cada una de las estaciones virtuales telemétricas desde el centro del radar de San Salvador para así poder observar cada uno de los obstáculos que se encuentran en el camino del haz, los cuales son fuentes de atenuación de la intensidad y potencia del haz del radar. Cada trazo se extenderá 20 km en las direcciones N (norte) equivalente al ángulo de 0° grados y así sucesivamente en la rotación de las agujas del reloj hasta completar los 360° hasta que se logro abarcar cada una de las estaciones utilizadas.

Se utilizó puntos de elevación en los cuales el haz intercepta una montaña o cordillera y/o edificios observados en cada uno de las trazas para luego identificarlos como puntos de atenuación del haz, se tomó sus coordenadas geográficas y su posicionamiento (altura, dirección y distancia) hacia el radar como eje central.

A cada punto encontrado como atenuador del haz se le calculó su ángulo efectivo vertical y la potencia que logra pasar sobre dicho atenuador. La potencia se obtuvo como la razón del ángulo efectivo y el ángulo máximo a 10 grados desde el eje de haz como producto de los 12.5 kW de fábrica que posee el radar, las constantes del radar han sido calculadas utilizando la relación entre los datos del proveedor, la ganancia de la antena y su respectiva perdida por atenuación; cabe mencionar que estas constantes son utilizando los datos del proveedor; más adelante se menciona una constante de corrección la cual se utiliza para hacer el ajuste de datos de reflectividad con respecto a los datos tomados por el radar.

Se relacionó las constantes y las variaciones de la potencia con respecto a los ángulos efectivos y reales de cobertura del haz del radar para dichas estaciones telemétricas y así se obtuvo una relación de precipitación mínima detectable por el radar para diferentes valores ideales de precipitación constante, 10 mm, 50 mm y 100 mm, además de la estimación de los datos de lluvia obtenidos con la red telemétrica, que se encuentre en un rango de 20 km para diferentes tipos de lluvia durante la época lluviosa analizada, y así se logró obtener los valores umbrales en los que se tiene visibilidad débil o nula. Para realizar alertamiento de corto plazo de diferentes eventos de lluvia principalmente en San Salvador.

### 2.3 Método de Marshall-Palmer

La estimación de la intensidad de lluvia a partir de los datos de RADAR está basada en modelos estadísticos empíricos que a través de experimentos buscan obtener una correlación de las variables como reflectividad de radar (Z) e intensidad de lluvia (R).

Experimentos como estos se han llevado a cabo por más de 60 años en el campo de meteorología de radar debido a la importancia de ser precisos en la determinación de la intensidad de lluvia por medio de la datos (reflectividad) de radar. La correlación entre las variables (Z-R) están fuertemente ligadas a la distribución del tamaño de las gotas (DTG). Otros parámetros pertenecientes a las lluvias como el contenido de la lluvia (agua, granizo, nieve, etc), la atenuación y la extinción óptica están también en función de la DTG. [15]

La fórmula de Marshall-Palmer [16] correlaciona las variables Z-R de la siguiente manera:

$$Z = aR^b \quad (5)$$

donde Z en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  es la reflectividad y R (mm/h) la intensidad de la lluvia. Los parámetros a y b dependen de la DTG [17]. Como se puede observar es lógico que la variabilidad natural en la distribución del tamaño de las gotas sea una importante fuente de incertidumbre en la estimación de intensidad de lluvia por medio de radar. La relación más ampliamente utilizada para la distribución de tamaño de gotas de lluvia es la de Marshall-Palmer (1948) quienes encontraron que una función exponencial se ajusta razonablemente bien. Marshall y Palmer encontraron los siguientes valores de  $a = 200$  y  $b = 1.6$ . Battam en 1973, [18] presentó una lista de 69 relaciones de valores para Z-R para diferentes condiciones climáticas en diferentes partes del mundo. Puede haber grandes cambios en los valores de Z-R no sólo bajo diferentes condiciones climáticas o regiones del mundo sino también entre tormentas individuales.

En la siguiente tabla [19] se pueden observar diferentes valores para a y b determinados por diferentes estudios para diferentes tipos de precipitación:

Tabla 2.3.1: Valores para a y b de la ecuación de Marsall-Palmer.

$Z = AR^b$	A	b	Validez
Marshall – Palmer (1948)	200	1,6	Precipitaciones homogéneas y eventos estratiformes
Blanchard (1953)	31	1,37	Precipitaciones orográficas
Jones (1956)	486	1,37	Precipitaciones convectivas
Joss y Waldvogel (1967)	230	1,4	Precipitaciones medias
Joss y Waldvogel (1967)	400	1,3	Procesos convectivos intensos
Joss y Waldvogel (1967)	100	1,4	Procesos frontales – gotas muy pequeñas
Smith et. al. (1975)	155	1,88	Procesos convectivos – presencia de granizo
Sekhon y Srivastava (1970)	1780	2,21	Nieve

### 2.3.1 Estimación de intensidad de lluvia utilizando la relación Z-R

Para llevar a cabo la estimación de intensidad de lluvias por medio de la relación Z-R se realizaron 10 estudios de caso de 10 eventos lluviosos o tormentas sucedidas en la época lluvia 2013 que ocurrieron en el rango de los 20 km de radio alrededor del radar de San Salvador. Para el análisis de cada estudio de caso se utilizaron los datos obtenidos de estaciones telemétricas automáticas del MARN que se encontraban en el radio antes mencionado y los datos P00 de reflectividad de radar.

Para la obtención de los datos de reflectividad se siguió el siguiente procedimiento: se utilizó una aplicación SCRIPT informático, de elaboración propia, para la captura de los datos de reflectividad de los radares meteorológicos. Se obtuvo los datos del radar de San Salvador de las imágenes con 60 km de radio ya que los píxeles de éste son de 500m x 500m en lugar de los 1000m x 1000m para el de radio de 120 km, con el propósito de reducir el área de análisis a una superficie más representativa. Se eligió una cuadrícula o grid de 3 x 3 píxeles tomando como centro el pixel correspondiente a cada estación de interés (tabla 2.3.1.1), y de ésta forma se asignó a la estación analizada un valor de reflectividad promedio obtenida de la cuadrícula de 3 x 3 píxeles.

**Tabla 2.3.1.1:** Tabla que muestra la forma de la cuadrícula o grid escogida para asignar un valor de decibeles promedio a la estación de análisis que se encuentra en el centro de la cuadrícula.

(x-1,y+1)	(x,y+1)	(x+1,y+1)
(x-1, y)	(x, y)	(x+1,y)
(x-1,y-1)	(x,y-1)	(x+1,y-1)

Para el cálculo de R a partir de los valores de reflectividad despejamos de la ecuación de Marshall-Palmer:

$$Z = aR^b \quad (5)$$

Se utilizo lo valores de Marshall-Palmer de a y b para precipitaciones homogéneas y eventos estratiformes (ver tabla 2.3.1) y aplicando *log* a ambos lados de la ecuación se tiene:

$$\log Z = \log 200 + \log R^{1.6} \quad (6)$$

aplicando regla de logaritmos y exponentes y despejamos log R:

$$\log R = \frac{\log Z}{1.6} - \frac{\log 200}{1.6} \quad (7)$$

para despejar R elevamos ambos lados de la ecuación como potencias de 10:

$$R = 0.036(10^{0.625(\log Z)}) \quad (8)$$

pasando la reflectividad Z a decibeles (dB) que es 10 veces el log Z:

$$dBZ = 10(\log Z) \quad (9)$$

Así, la ecuación a utilizada para calcular la intensidad de lluvia en mm/h, a partir de los datos de reflectividad obtenidos del radar es:

$$R = 0.036(10^{0.0625(dBZ)}) \quad (10)$$

Esta relación de decibeles es modificada para introducir una constantes de ajuste del radar llevándola a la siguiente forma.

$$\text{Tasa de lluvia} = 10^{(((dBz / 4) - 10 * \text{Log}_{10}(200)) / (10 * 1.6))} \quad (11)$$

La explicación de esta ecuación se da en el siguiente capítulo de esta investigación

## 2.4 Diseño de Sistema de Alerta Temprana

El SAT tiene las siguientes funciones principales:

1. Observación e interpretación de imágenes de radar:  
Se mantendrá continuo monitoreo y vigilancia de los sistemas atmosféricos sobre territorio salvadoreño que puedan causar afectaciones debido a la producción de lluvias de fuerte intensidad, repentina y/o persistentes.
2. Procesamiento y análisis de los datos de reflectividad:  
Se procesarán los datos de reflectividad en tiempo real para producir acumulados de lluvia en regiones previamente seleccionadas y analizadas a través de los estudios de caso, estas regiones o grillas han sido denominadas estaciones virtuales pluviométricas.
3. Producción de alarma automática:  
Se producirán una alarma automática de uso interno, cuando las estaciones virtuales alcancen umbrales de lluvia acumulada de interés, previamente establecidos.
4. Verificación de la alarma:  
Se verificará la alarma automática por medio de las otras herramientas con las que dispone el Observatorio Ambiental como: la red de estaciones pluviométricas, imágenes de satélite, reportes METAR, observadores voluntarios, entre otros. Luego de esta verificación y evaluación se comunicará esta información a las autoridades correspondientes vía servicio de mensajes cortos conocidos por mensajes de texto sms o radio VHF a Protección Civil
5. Diseño de protocolo para envío de mensajes de texto o comunicación por radio:  
Envío de mensajes de texto y comunicación por radio con Protección Civil después de la verificación y evaluación de la información recabada.
6. Envío de mensajes de texto vía twitter.

Estos datos y alarmas servirán como nuevos insumos que podrán ser utilizados dentro de los protocolos de procedimientos del MARN.

A continuación se muestra la estructura o contenido, preliminar del documento del SAT:

1. Portada.
2. Índice.
3. Introducción.
4. Objetivos.
5. Marco de Referencia
6. Alcance e insumos.
7. Marco teórico
  - 7.1 Red de radares meteorológicos, LAWR (Local Area Weather Radar)
8. Descripción de Procedimiento y procesos
9. Diagrama de Flujo
10. Glosario
11. Referencias bibliográficas

Este documento va anexado a esta investigación (ver sub capítulo 7.10).

### 3 Resultados y Discusión

Para la estimación de intensidad de lluvia se seleccionó 10 estaciones telemétricas como referencias, en un radio menor a 20 kilómetros, teniendo al radar como su centro. En la siguiente tabla se muestran las estaciones seleccionadas, con sus coordenadas, pixeles de imagen de radar, elevación y su distancia desde el radar:

Tabla 3.1: Estaciones telemétricas seleccionadas con sus coordenadas y pixeles correspondientes.

Estacion	COORDENADAS		PIXELES		Lamb			Distancia (Km)
	N	O	X	Y	CoordX	CoordY	Elevacion (m)	
Apopa	13.796	-89.174	131	96	481168.0000	297177.0000	429.2	13.6
Tonacatepeque	13.782	-89.114	144	99	487622.0000	295665.0000	610.8	16.5
Boqueron	13.734	-89.267	111	109	471069.0000	290357.0000	1592.1	6.6
Picacho	13.765	-89.256	114	103	487622.0000	295665.0000	610.8	9.2
UES	13.718	-89.203	125	113	478076.0000	288646.0000	694.0	4.5
Ilopango	13.698	-89.118	144	117	487203.0000	286405.0000	612.0	12.3
PROCAFE	13.684	-89.287	108	121	468996.0000	284872.0000	959.0	6.1
La Cima	13.659	-89.215	123	126	476739.0000	282043.0000	924.6	3.6
Belloso	13.693	-89.191	128	119	479339.0000	285835.0000	640.0	4.4
El Piro	13.682	-89.244	119	120	473651.0000	284559.0000	805.4	1.5

En la tabla 2.3.1 se mostraron diferentes constantes A y B para la ecuación de Marshall-Palmer que pueden ser utilizadas para la estimación de intensidad de lluvia dependiendo del tipo de precipitación, para los casos de estudios se utilizó las constantes propuestas por Marshall y Palmer,  $A = 200$  y  $B = 1.6$ .

Se obtuvo los perfiles de elevación para cada estación telemétrica con el fin de verificar su viabilidad en cuanto a posibles bloqueos en la trayectoria entre el radar y cada estación y la distancia entre ambos. A continuación se pueden observar dichos perfiles, donde las estrellas en cada figura indica la posición del radar y la esfera roja la posición de cada estación, como se puede observar en las figuras se seleccionaron las estaciones que presentaban menor bloqueo y una distancia dentro del radio de 20 Km alrededor del radar:

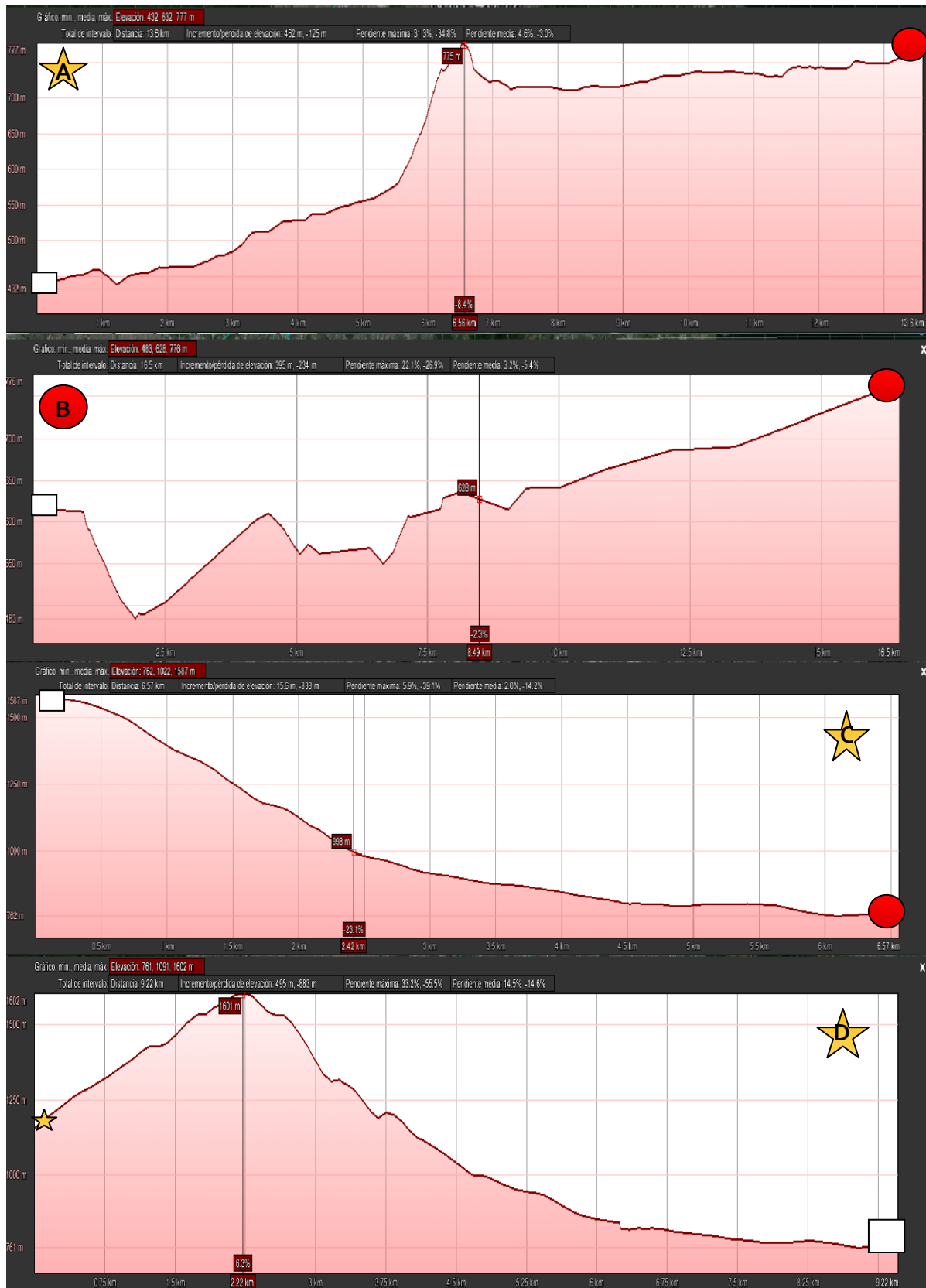


Figura 3.1: Perfiles de elevación: A: Apopa, B: Tonacatepeque, C: Boquerón, D: Picacho.

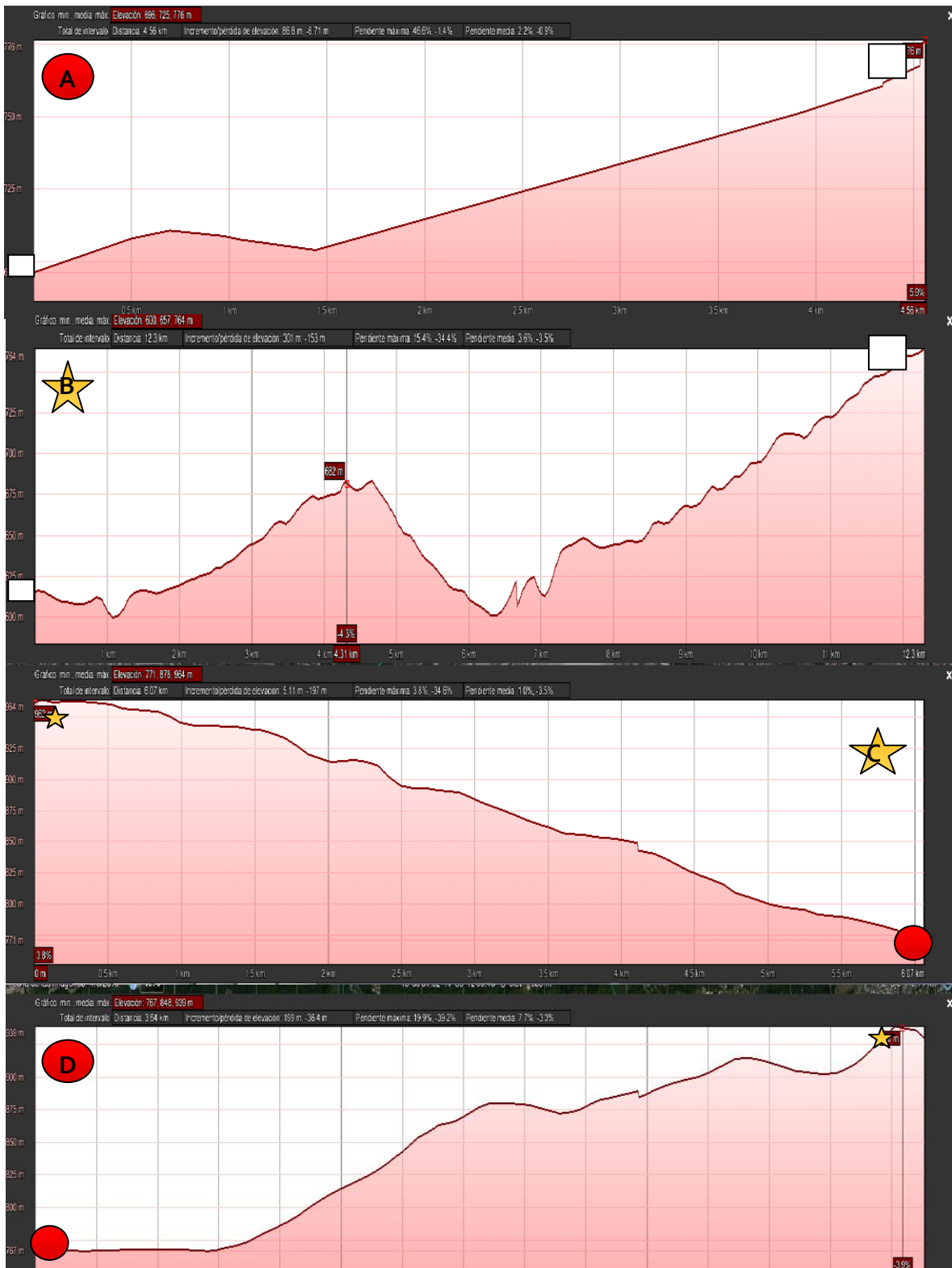


Figura 3.2: Perfiles de elevación: A: UES, B: Ilopingo, C: PROCAFE, D: La Cima



Figura 3.3: Perfiles de elevación: A: Beloso, B: El Piro.

### 3.1 Automatización de datos P00

Para la obtención de los datos de radar se utilizó la herramienta informática de Microsoft Excel en la cual se programó un script el cual se detalla a continuación su automatización:

Debido a que los datos P00 son datos encriptados por el vendedor de los radares FURUNO se utiliza una herramienta provista por el vendedor en la cual hace el llamado de los datos y su respectiva decodificación a lenguaje de Visual Basic, su nombre es LawrTool es un archivo ejecutable (.exe) el cual brinda la información del día, hora, coordenada en pixeles de la reflectividad almacenada en los datos P00.

Se utilizó un ciclo **FOR** para incluir los siguientes datos de entrada para cada uno de los casos de estudio analizados los cuales se detallan a continuación:

im: mes de estudio

id: día de estudio

ih: hora

jm: minutos

Para cada dato de entrada era necesario utilizar la bitácora de los eventos de lluvia en los cuales se había visto involucrado el radar de San Salvador durante la época de lluvia del año 2013.

Con un ciclo **if** se hizo el llamado de los datos en los cuales se le especificaba el lugar de destino de almacenamiento de los datos **RadarImage.LoadRadarImage("sal1", 2013, im, id, ih, jm, "z:\")** donde z:/ es el disco duro donde se almacenan los datos P00, además se pide los datos de entrada de cada una de las coordenadas de las estaciones telemétricas en pixeles tomadas de la siguiente imagen.

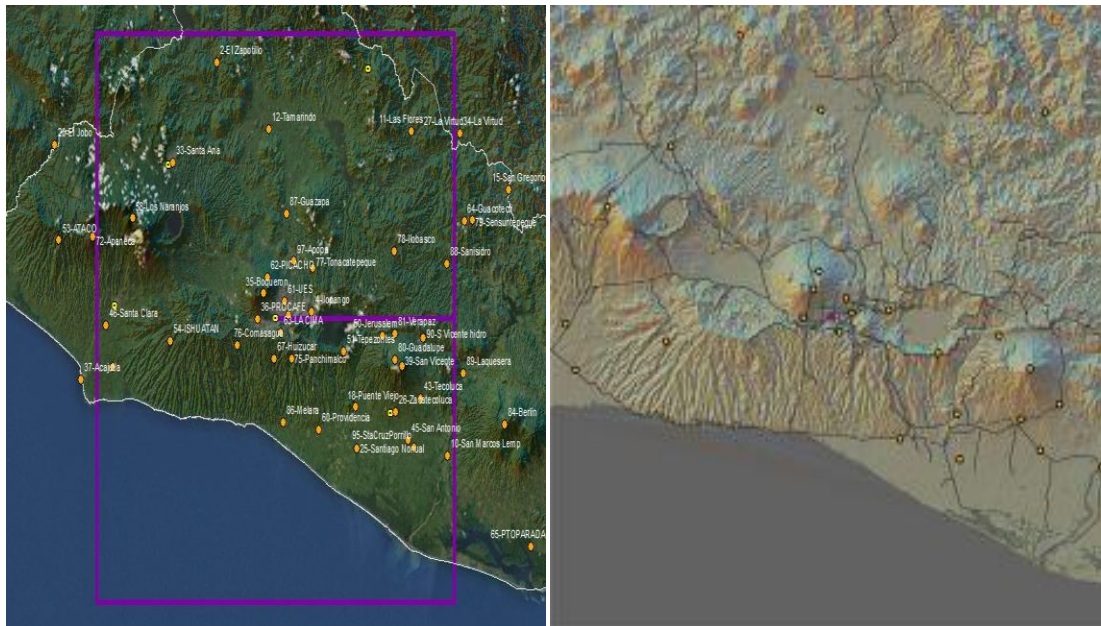


Figura 3.1.1: Estaciones telemétricas en imagen pixeles de 240\*240 (Izquierda), estaciones telemétricas de San Salvador (Derecha) ambas con 120km de radio.

Se asigna una variable X a cada uno de los valores de reflectividad por cada uno de los pixeles analizados en el recorrido de acción de cada una de las estaciones telemétricas analizada, es decir, se tomó el promedio de 0.5km de 9 puntos alrededor de las coordenadas en pixeles de la estación virtual a analizar, el área de cobertura de cada dato de reflectividad es de  $2.25\text{km}^2$  lo cual asegura que la estación telemétrica quede dentro del estudio del caso analizado.

Se hizo que el Script mostrara cada uno de los valores a consideración en 4 columnas y cada cual contenga Fecha/hora, coordenada **i** y coordenada **j** del dato analizado, además del valor de reflectividad almacenado para cada X, cabe mencionar que la escala de los datos de radar están adaptadas a una escala de colores de 0 hasta 64 dbz según se detalla a continuación.



Figura 3.1.2: Datos de decibeles actuales del radar LAWR

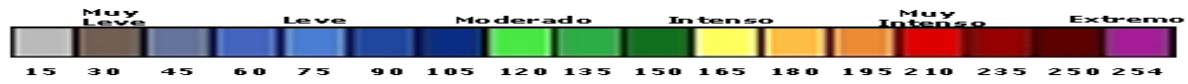


Figura 3.1.3: Valores de pixeles propuesta para el radar LAWR

Tabla 3.1.1: Datos RGB de los colores de la nueva paleta de colores

COLOR	RED ROJO	GREEN VERDE	BLUE AZUL
45	98	116	156
60	67	100	190
75	74	156	209
90	32	72	158
105	9	45	131
120	72	130	69
135	43	173	68
150	17	112	30
165	255	255	93
180	253	188	70
195	234	138	51
210	220	1	1
235	150	1	0
250	92	1	0
254	166	28	152

Tabla 3.1.2: Significado del código de colores de la nueva paleta de colores del radar de San Salvador según su RGB.

Color	R(Rojo)	G(Verde)	B(Azul)
15	185	185	185

La obtención de los datos de la nueva paleta de colores es nada mas por asignación subjetiva, es decir, el color gris que se observa en la figura 3.1.3 según la tabla 3.1.1 se obtuvo con un software de edición de imágenes la cual al colocar el puntero sobre dicho pixel mostró el dato RGB de la imagen y se repite el proceso hasta lograr abarcar los 254 pixeles de la nueva paleta.

**Ejemplo 1:** [235 150 1 0](#) para el pixel 235 de nuestra paleta le corresponde un valor de Rojo 150 Verde 1 y Azul 0

### 3.2 Cálculo de tasa de lluvia utilizando Marshall- Palmer

La adquisición de datos de reflectividad a través del script mencionado anteriormente se hizo la llamada de cada uno de los valores de pixelaje de la variable X, la cual se introduce en una de las columnas mostradas en la tabla de Excel para así obtener la relación de Marshall-Palmer de cada una de las estaciones telemétricas analizadas como se detalla en la siguiente función

$$F(X) = 10^{(((x / 4) - 10 * \text{Log}_{10}(200)) / (10 * 1.6))}$$

Para la obtención del logaritmo base 10 se crea una sub función para el cálculo de cada dato para así generar automáticamente los valores de lluvia estimada f(x).

```
Function Log10(x As Double) As Double
```

```
Log10 = Log(x) / Log (10)
```

```
End Function
```

Quedando el Script para la automatización de los datos como se muestran a continuación:

```
Public im As Integer, id As Integer, ih As Integer, jm As Integer
```

```
Public RadarImage As Object
```

**Dim col As Integer**

**Sub Main()**

**Dim i As Integer, j As Integer**

**Dim wb As New Worksheet**

**col = 1**

**Set RadarImage = CreateObject("LawrTool.automation")**

**For im = 8 To 8**

**For id = 30 To 30**

**Debug.Print id; "/"; im**

**For ih = 0 To 23**

**For jm = 0 To 55 Step 5**

**If RadarImage.LoadRadarImage("sal1", 2013, im, id, ih, jm, "z:\") Then**

**For i = 143 To 145**

**For j = 116 To 118**

**CreateRainPoint i, j**

**Next j**

**Next i**

**End If**

**Next jm**

**Next ih**

**Next id**

**Next im**

**Set RadarImage = Nothing**

**End Sub**

**Sub CreateRainPoint(i As Integer, j As Integer)**

**Dim x As Double**

**x = RadarImage.GetPixelValue(i, j)**

**If x > 0 Then**

**Debug.Print x**

```

Cells(col, 1) = RadarImage.RadarTime
Cells(col, 2) = i
Cells(col, 3) = j
Cells(col, 4) = x / 4
Cells(col, 5) = 10 ^ (((x / 4) - 10 * Log10(200)) / (10 * 1.6))
col = col + 1
End If

```

End Sub

**Function Log10(x As Double) As Double**

**Log10 = Log(x) / Log(10)**

**End Function**

La siguiente tabla muestra la generación de datos para una de las estaciones virtuales telemétricas analizadas, si se desea ver todo el proceso y hojas de cálculo se recomienda usar el CD de datos brindados en esta investigación.

Tabla 3.2.1: Muestra la salida de datos al hacer la implementación del script

	A	B	C	D	E
	Fecha/hora	i	j	dBz	Tasa de lluvia (mm/h)
1					
2	30/08/2013 08:00	143	118	36.5	0.09328282
3	30/08/2013 10:30	145	116	25	0.01782591
4	30/08/2013 12:25	144	117	18.25	0.00674802
5	30/08/2013 12:25	144	118	21.5	0.01077213
6	30/08/2013 12:35	143	118	18.25	0.00674802
7	30/08/2013 15:20	145	117	21.25	0.01039146
8	30/08/2013 17:20	143	116	19.75	0.00837388
9	30/08/2013 17:20	143	117	22	0.01157582
10	30/08/2013 17:20	143	118	22.75	0.01289516
11	30/08/2013 17:20	144	116	20.5	0.00932828
12	30/08/2013 17:20	144	117	23.25	0.01385724
13	30/08/2013 17:20	144	118	22.25	0.01199987
14	30/08/2013 17:20	145	116	24.5	0.01658829
15	30/08/2013 17:20	145	117	25.25	0.01847892
16	30/08/2013 17:20	145	118	24.5	0.01658829
17	30/08/2013 17:25	143	116	25.25	0.01847892
18	30/08/2013 17:25	143	117	25	0.01782591
19	30/08/2013 17:25	143	118	27.25	0.02464204
20	30/08/2013 17:25	144	116	27	0.02377123
21	30/08/2013 17:25	144	117	28.5	0.02949862
22	30/08/2013 17:25	144	118	31	0.04227189
23	30/08/2013 17:25	145	116	29.75	0.03531235

Cabe mencionar que se utilizó una constante de ajuste para hacer la corrección de datos de reflectividad del radar y lograr hacer la estimación de lluvia dicha constante es un factor de ajuste de los datos de tasa de lluvia brindados por las coordenadas y sus píxeles en específico y la variación con el tiempo de dicha reflectividad para lograr un mejor ajuste de la milímetros por hora, cada una de las constantes de ajuste se verán reflejadas en cada uno de los casos de estudio que se presentan a continuación para terminar mostrando un valor promedio de la constante que corrigió la estimación (ver tabla 3.4.1).

### 3.3 ESTUDIOS DE CASOS

A continuación se muestran los resultados de los estudios de caso realizados para la estimación de intensidad de lluvia. En cada caso se mostrará la estación donde se obtuvieron los mejores resultados: en cuanto a tendencias entre la curva de lluvia acumulada de estación versus radar y lluvia medida por estación versus estimada por radar. Para ver las demás estaciones consultar la sección de anexos o el CD de anexos.

#### 3.3.1 CASO 1: 18 DE JULIO DE 2013

En la siguiente figura se muestra una imagen satelital infrarroja de referencia, es decir, una imagen sin ningún sistema atmosférico sobre El Salvador; para lograr una mejor idea de lo observado en las imágenes posteriores que si contienen sistemas atmosféricos sobre el territorio.

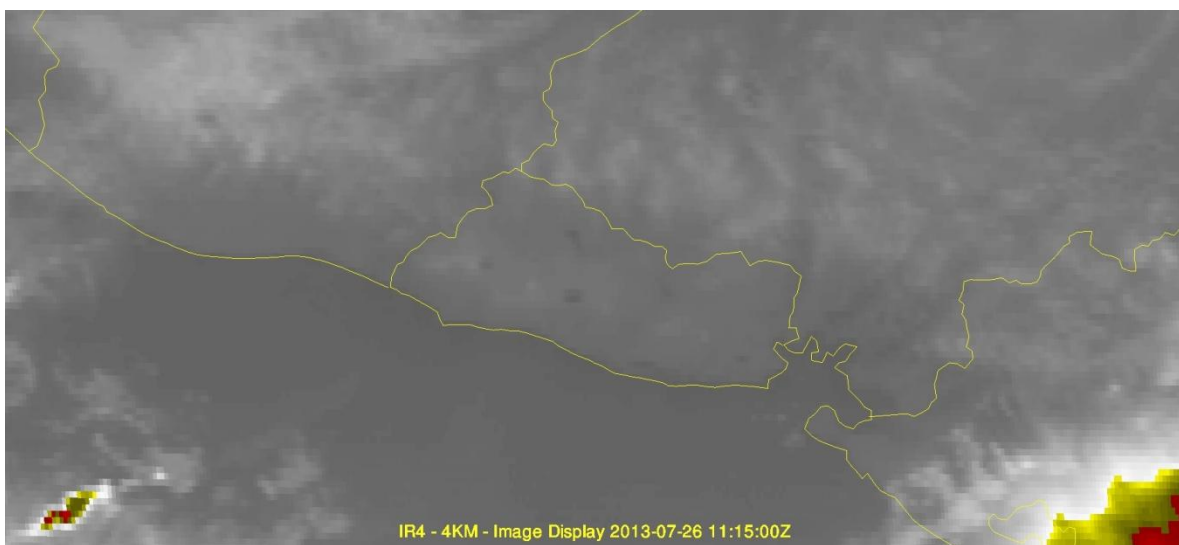


Figura 3.3.1.1: Imagen satelital infrarroja de las 11:15 horas (hora UTC), 05:15 horas (hora local), del 26 de Julio de 2013.

Las lluvias analizadas para este estudio de caso fueron provocadas por dos amplios núcleos convectivos que se desplazaron sobre El Salvador provocando tormentas dispersas con trayectorias de noreste a suroeste y de este a oeste. A las 18:15 horas (hora local) se observaba por medio de imágenes de satélite y de radar el desarrollo de estos núcleos convectivos y sus ingresos al territorio nacional en zona norte fronteriza con Honduras y por el este sobre el Golfo de Fonseca, como se muestra en las siguientes imágenes:

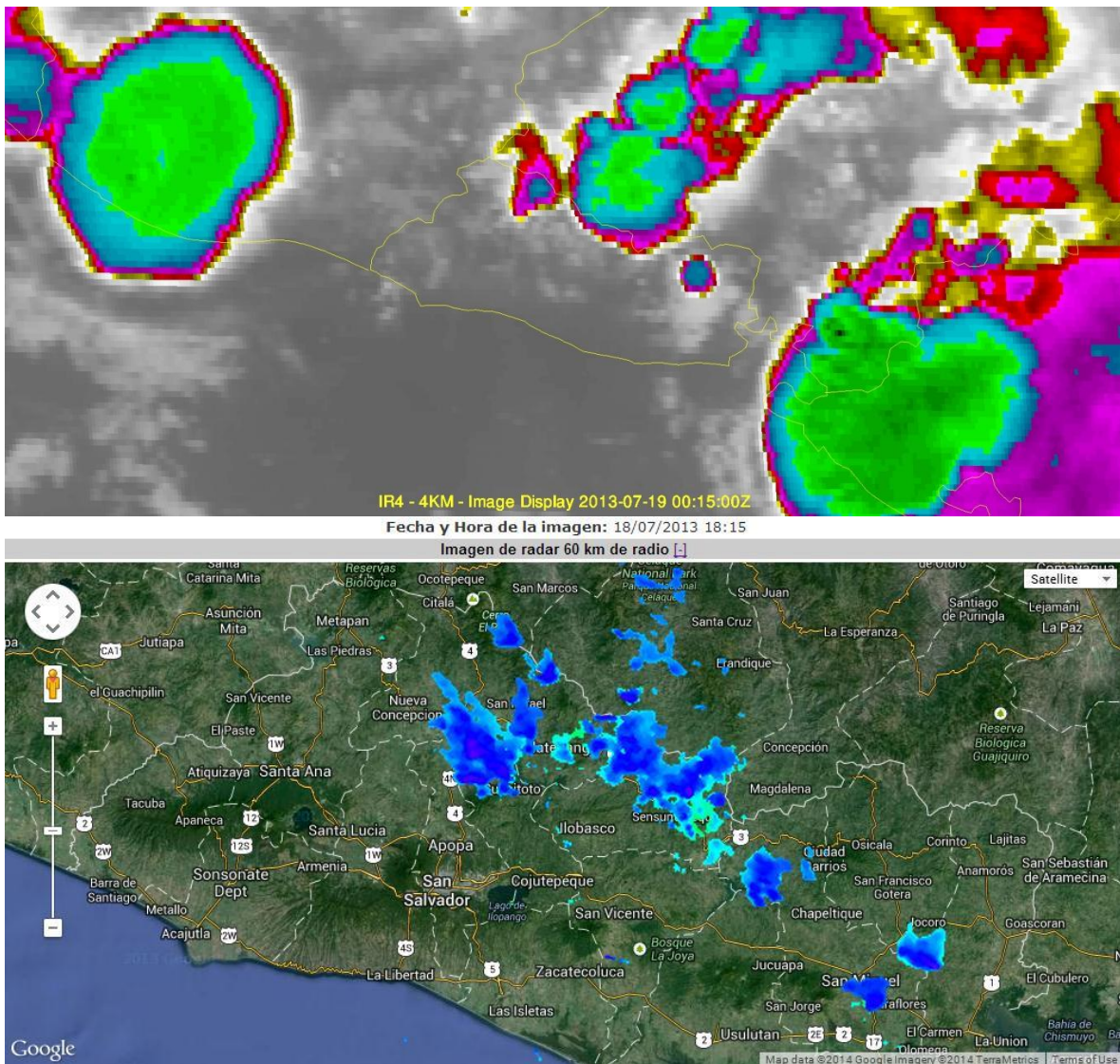


Figura 3.3.1.2: Imagen superior: Imagen satelital infrarroja de las 00:15 (hora UTC). Imagen inferior: imagen de radar de las 18:15 (hora local).

En las siguientes imágenes de satélite y de radar se observa el desplazamiento mencionado de estas tormentas sobre El Salvador, y al mismo tiempo sobre nuestra área de interés: Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

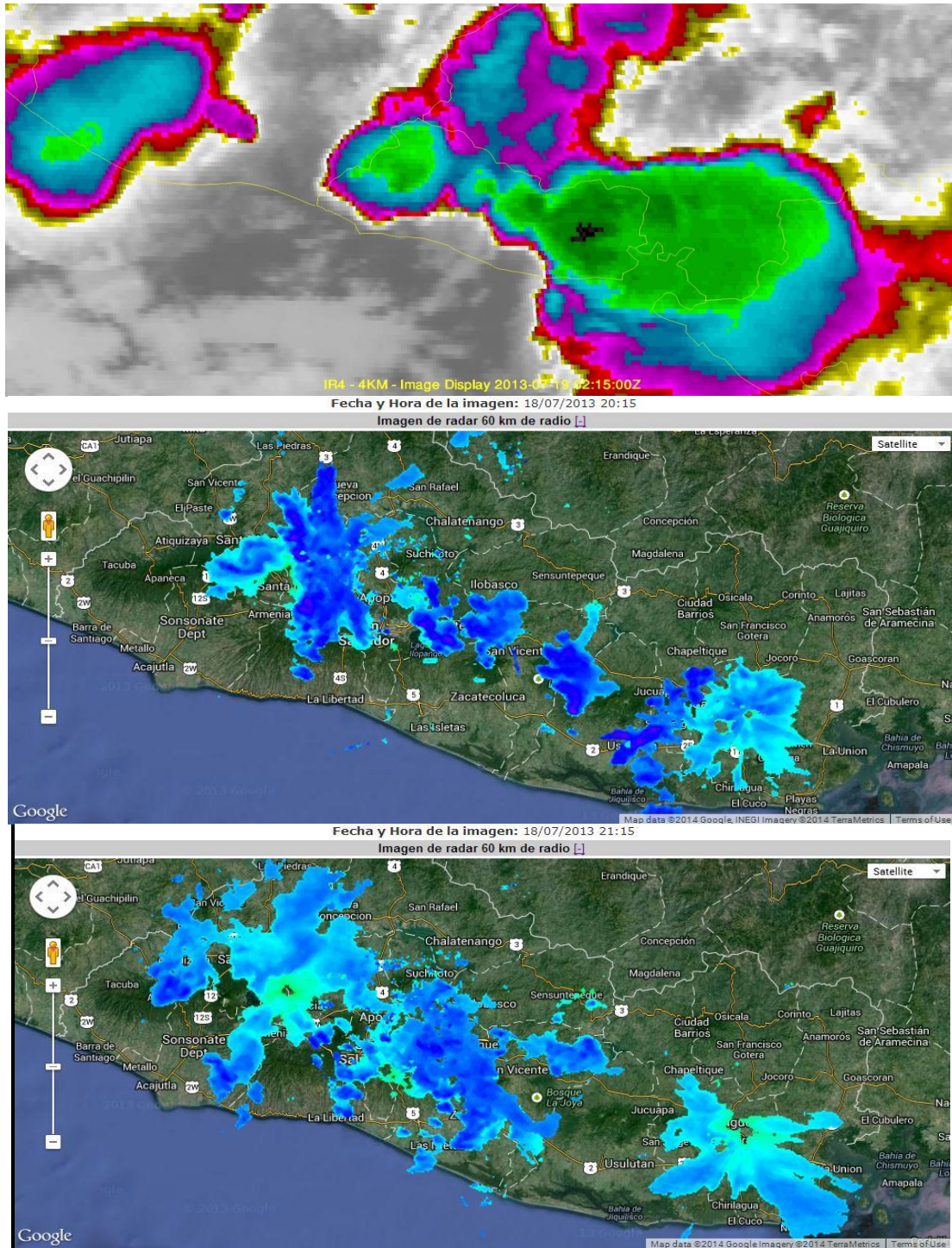


Figura 3.3.1.3: Orden descendente: Imagen satelital infrarroja (20:15). Imagen de radar (20:15). Imagen de radar (21:15).

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los datos para la estación de PROCAFE.

## PROCAFE

Tabla 3.3.1.1: Lluvia acumulada entre las 20:50 y las 23:50.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:50	0.09	0.33	0.4
21:00	0.31	1.15	0.6
21:10	1.43	5.23	1
21:20	1.51	5.50	1.2
21:30	1.54	5.64	1.4
21:40	1.82	6.66	4.8
21:50	1.98	7.22	6.8
22:00	2.11	7.69	7
22:10	2.35	8.58	7.6
22:20	2.40	8.77	8.8
22:30	2.53	9.25	9.8
22:40	2.77	10.10	10
22:50	2.95	10.76	10.8
23:00	3.05	11.12	11.4
23:10	3.18	11.61	12
23:20	3.35	12.24	12.2
23:30	3.56	13.01	13.2
23:40	3.79	13.83	13.6
23:50	3.98	14.52	14
00:00	4.17	15.23	14

En la tabla 3.3.1.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de PROCAFE (cuarta columna), lluvia acumulada estimada por reflectividad de radar utilizando la constante de ajuste (tercera columna) y sin constate (segunda columna). Se puede observar que la estimación de lluvia acumulada por medio de reflectividad se aproxima más a la medición realizada por la estación telemétrica en la columna 3.

También se observa en la gráfica 3.3.1.1 correspondiente a la tabla 3.3.1.1, donde se puede ver una muy buena correspondencia entre las tendencias de las curvas de lluvia acumulada medida por la estación telemétrica de PROCAFE y la estimada por reflectividad de radar. Esto nos demuestra que la estimación de la lluvia por medio de radar, en este caso, no sólo es buena en el valor de lluvia acumulada final sino también en los cambios de intensidad de la lluvia en intervalos cortos de tiempo.

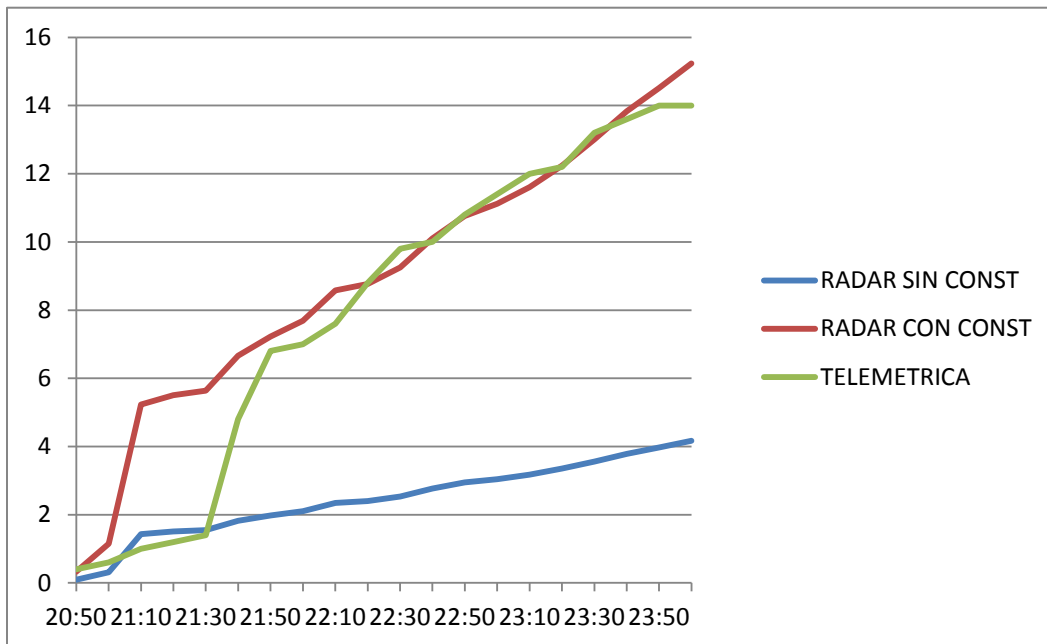


Gráfico 3.3.1.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 20:50 y 23:50.

En la gráfica de dispersión 3.3.1.2 se muestra la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h). Se puede observar con esta gráfica que es posible estimar rangos de intensidad de lluvia a partir de rangos de valores de dBz. Al final de este capítulo se mostrarán estos rangos obtenidos a partir de todos los datos de reflectividad recolectados, procesados y analizados, utilizando como referencia las 10 estaciones telemétricas seleccionadas y para los 12 estudios de caso. Además, podría asociarse a la paleta de colores de dBz existente un rango de intensidad de lluvia estimada para el área metropolitana de San Salvador. Sin embargo es necesario mencionar que las estaciones seleccionadas para realizar la estimación de intensidad de lluvia se encuentran en puntos con menor bloqueo y una distancia menor a 20 Km del radar, por lo que puntos con

orografía que pudiera producir bloqueos o distancias lejanas podrían dar resultados subestimados.

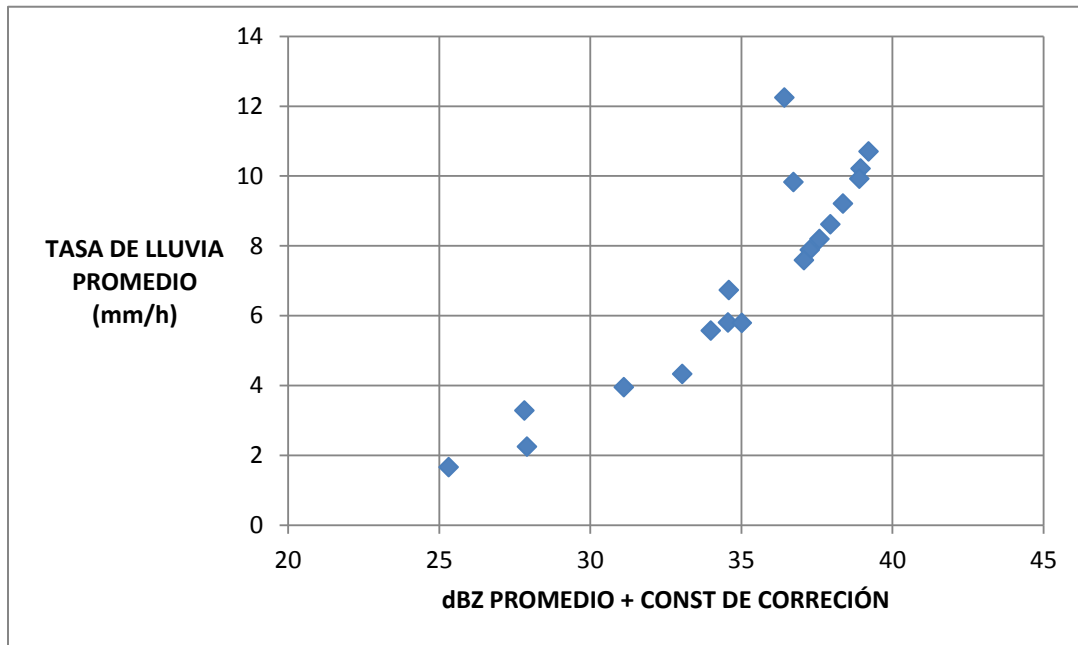


Grafico 3.3.1.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.2 CASO 2: 29 DE JULIO DE 2013

En la siguiente secuencia de imágenes satelitales infrarrojas se observan 2 fuertes núcleos convectivos que se desarrollaron en la zona norte del país y se desplazaron en dirección suroeste provocando fuertes lluvias en la zona central y occidental del país así como en el AMSS.

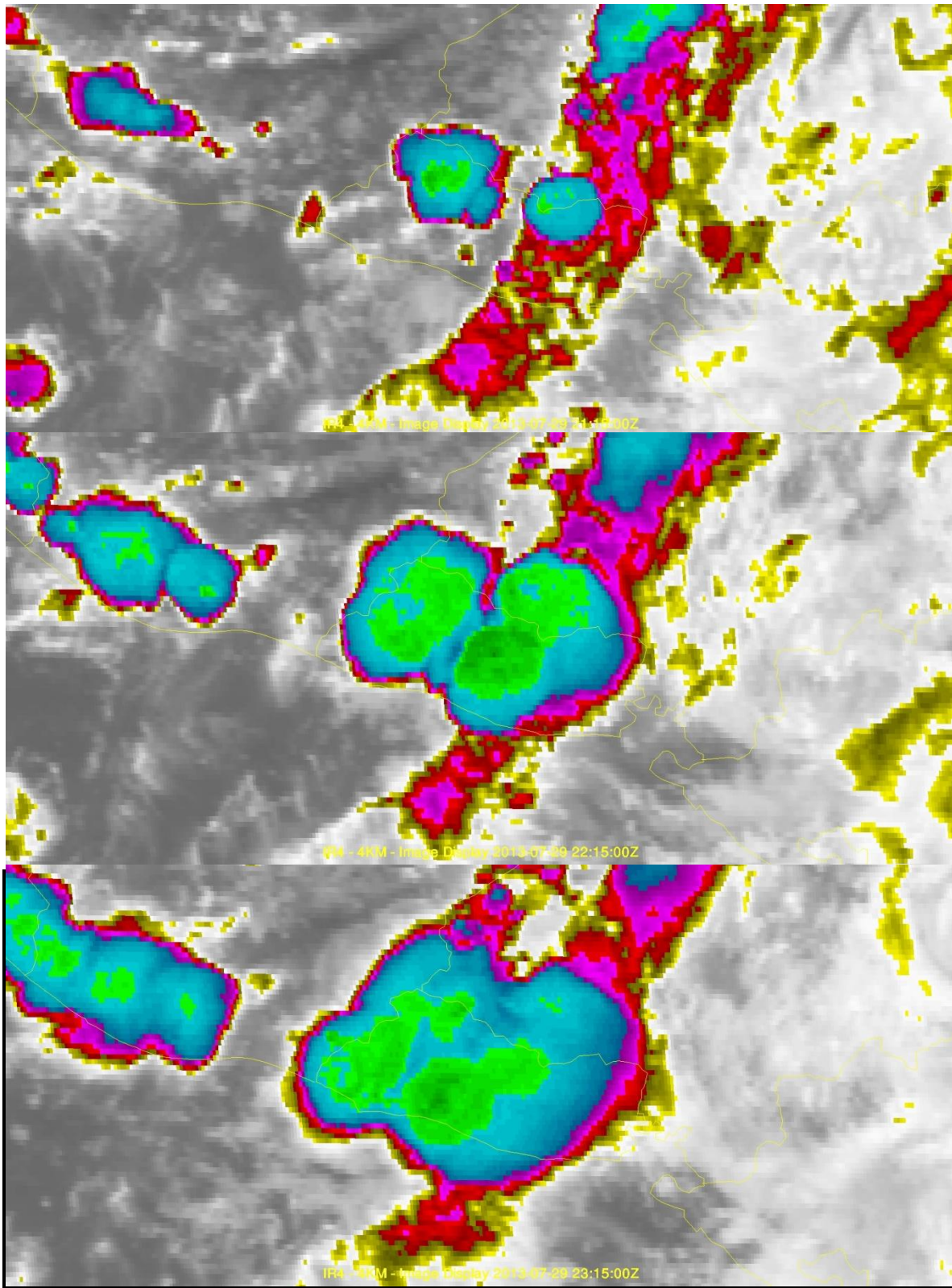


Figura 3.3.2.1: Imágenes satelitales infrarrojas. Orden descendente: 15:15, 16:15, 17:15 horas (hora local).

En las siguientes imágenes de radar se observa el desplazamiento de estas tormentas de moderada a fuerte intensidad sobre zona central, occidental y AMSS.

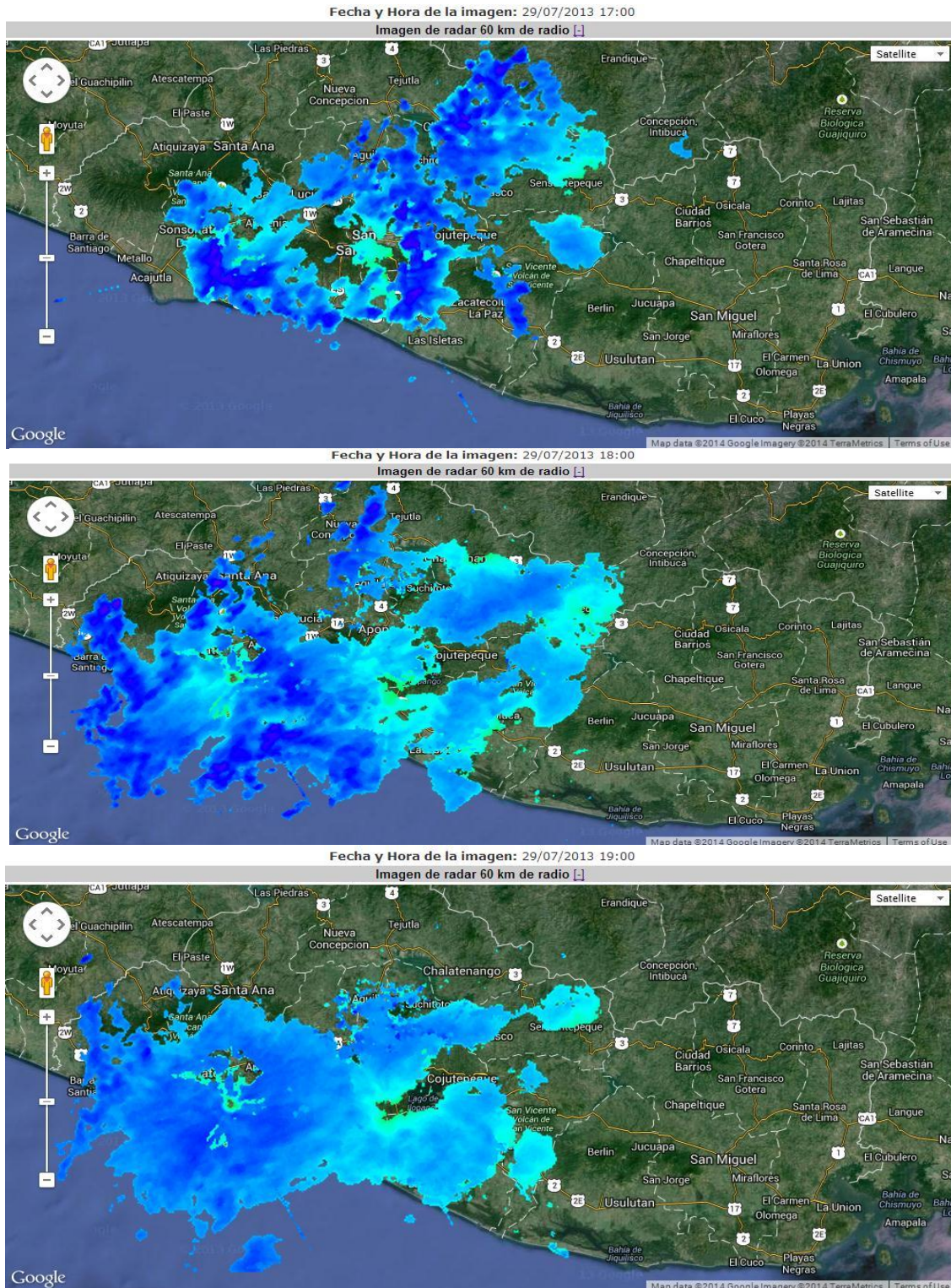


Figura 3.3.2.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 17:00, 18:00 y 19:00 horas (hora local).

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los datos para la estación de Boquerón para el 29 de Julio de 2013.

## BOQUERÓN

En la tabla 3.3.2.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Boquerón (cuarta columna), lluvia acumulada estimada por reflectividad de radar utilizando la constante de ajuste (tercera columna) y sin constate (segunda columna). Se puede observar nuevamente que la estimación de lluvia donde se utilizó la constante de ajuste es más cerca a la lluvia medida por la estación

Tabla 3.3.2.1: Lluvia acumulada entre las 17:10 y las 19:10.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
17:10	0.1	0.7	0.0
17:20	0.2	1.8	0.6
17:30	0.4	3.7	11.4
17:35	0.9	8.0	12.6
17:40	1.0	8.9	14.2
17:50	1.1	9.9	17.8
17:55	1.3	10.9	18.2
18:00	1.4	12.1	18.4
18:10	1.5	13.2	18.8
18:15	1.6	14.1	19.2
18:20	1.7	15.1	19.6
18:30	1.9	16.7	20.0
18:35	2.1	18.1	20.2
18:40	2.2	19.2	20.4
18:50	2.3	20.0	20.6
19:00	2.4	20.7	20.8
19:10	2.5	21.3	20.8

En la gráfica 3.3.2.1 correspondiente al conjunto de datos de la tabla anterior se puede observar una correspondencia aceptable entre las tendencias de las curvas de lluvia acumulada medida por la estación telemétrica de Boquerón y la estimada por reflectividad de radar.

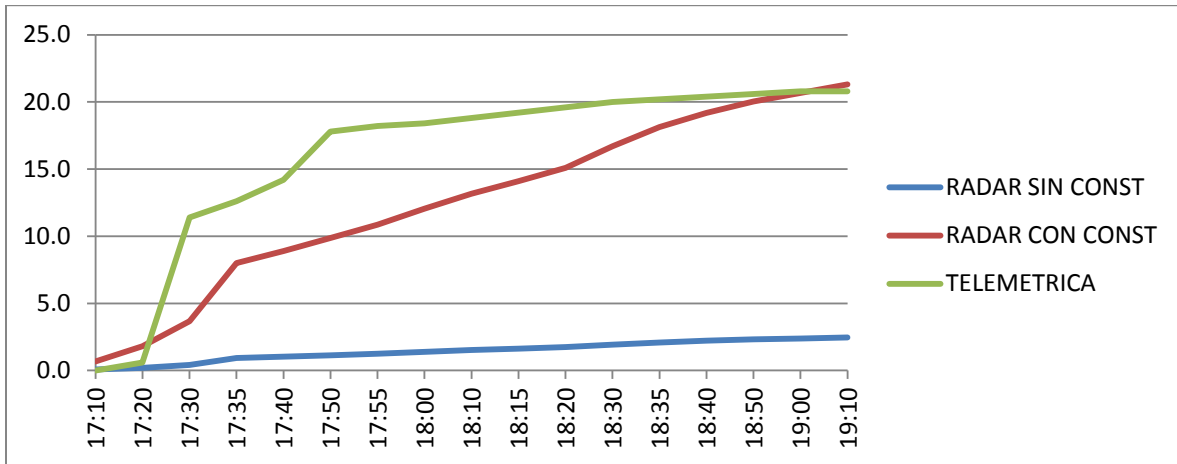


Grafico 3.3.2.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 17:10 y 19:10.

En la gráfica de dispersión 3.3.2.2 se observa la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación del Boquerón. Se puede estimar con estas gráficas rangos de intensidad de lluvia a partir de rangos de valores de dBz.

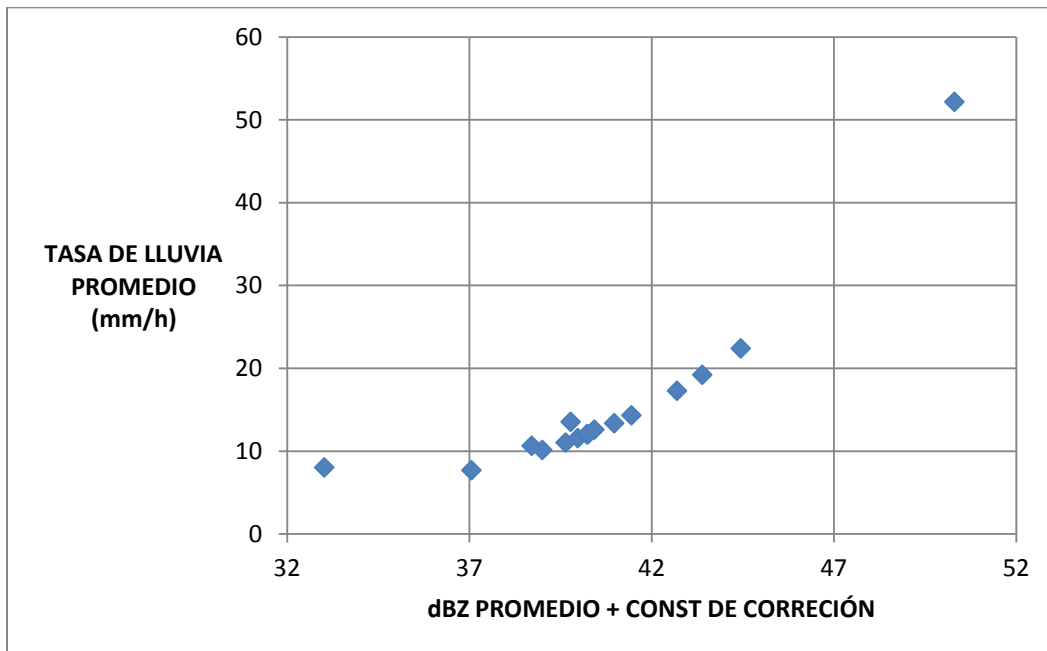


Grafico 3.3.2.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.3 CASO 3: 11 DE AGOSTO DE 2013

Las lluvias analizadas para este estudio de caso fueron del tipo dispersas, de leve a moderada intensidad y de corta duración, para el intervalo de las 13:00 y 14:00 horas. Se produjeron con mayor énfasis sobre Cordillera Volcánica Central y zona norte. Sin embargo también se analizó lluvias sucedidas en horas de la tarde y la noche como se puede verificar en las demás estaciones para este caso en la sección de anexos.

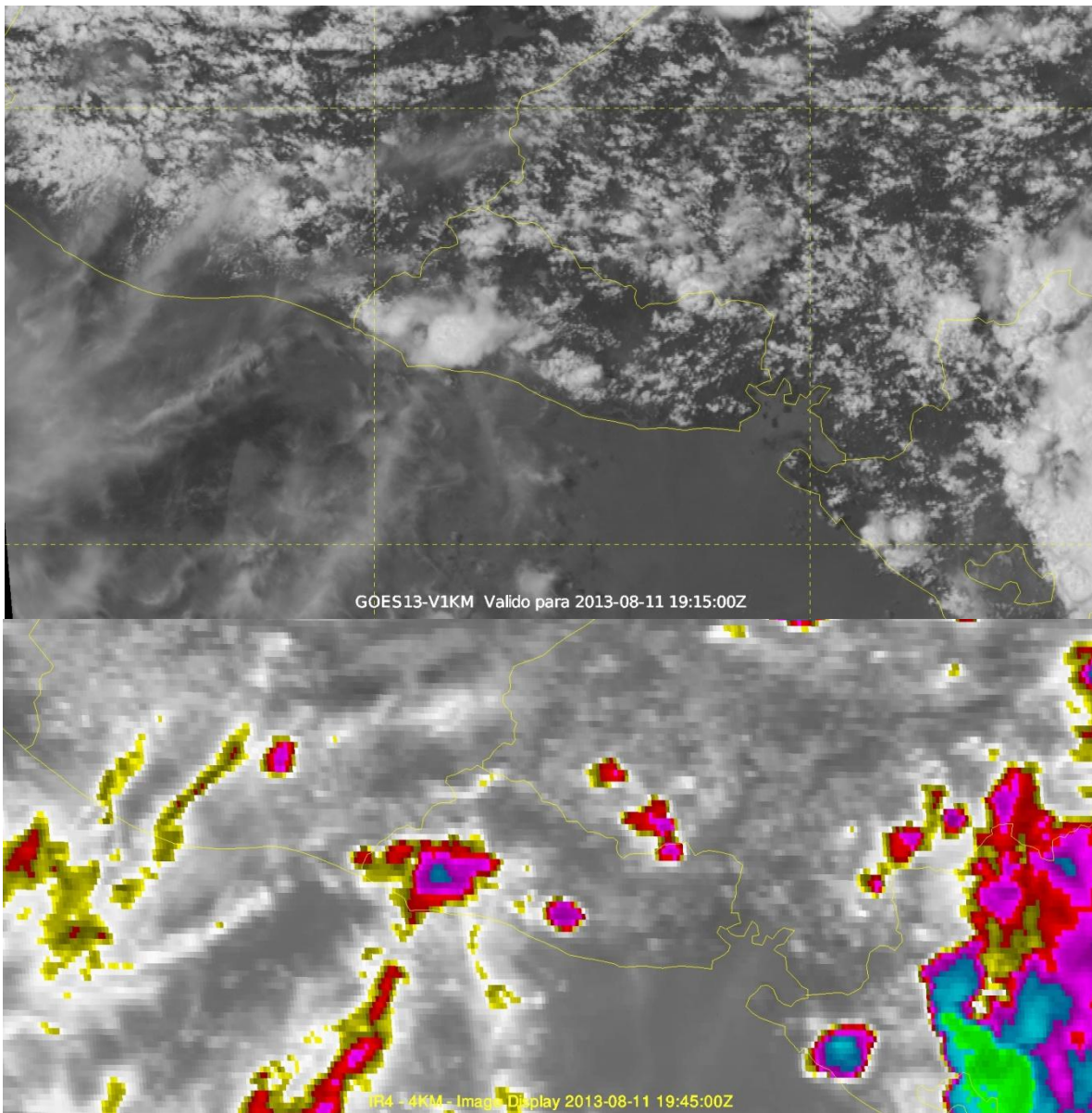


Figura 3.3.3.1: Imágenes satelitales. Orden descendente: Imagen visible: 13:15 (hora local), imagen infrarroja 13:45 (hora local).

En las siguientes imágenes de radar se observar las lluvias analizadas para el intervalo de las 13:00 a 14:00 horas.

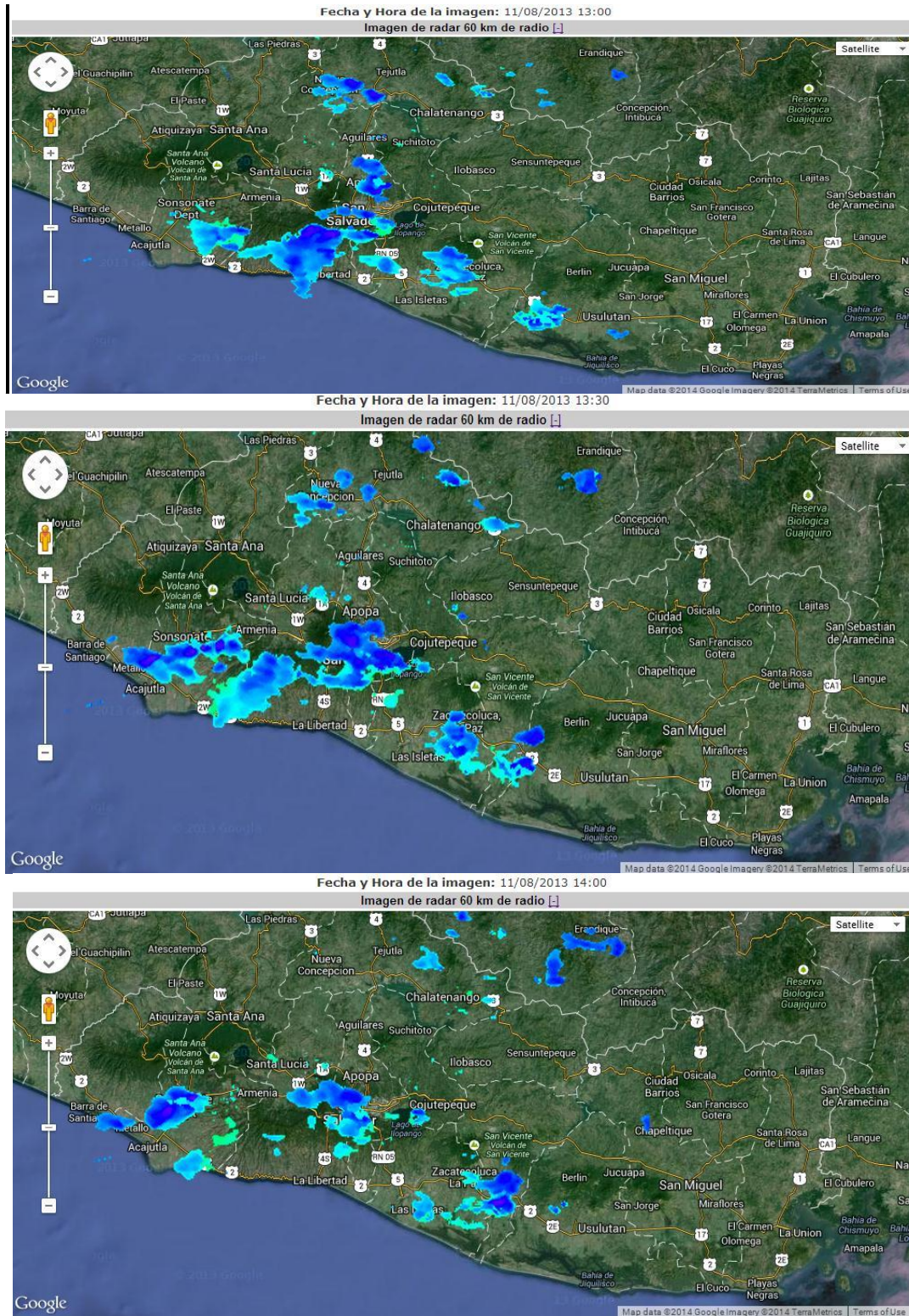


Figura 3.3.3.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 13:00, 13:30 y 14:00 horas (hora local).

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los datos para la estación de Boquerón para el 11 de Agosto de 2013.

## BOQUERÓN

En la tabla 3.3.3.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Boquerón y la estimada por medio de reflectividad de radar. Se observa nuevamente que la estimación de lluvia por medio de radar utilizando la constante de ajuste es buena.

Tabla 3.3.3.1: Lluvia acumulada entre las 13:10 y las 14:10.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
13:10	0.0	0.1	0.0
13:15	0.1	0.5	0.2
13:20	0.6	2.3	1.6
13:30	1.6	6.2	5.6
13:35	2.0	7.9	6.2
13:40	2.8	10.9	7.4
13:45	3.2	12.4	8.8
13:50	3.5	13.7	12.4
13:55	3.8	14.8	13.6
14:00	4.1	16.2	17.2
14:10	4.4	17.2	17.4

En la gráfica 3.3.3.1 se observan las curvas de lluvia acumulada de la estación de Boquerón y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 13:10 y 14:10 horas. Se puede observar muy buena concordancia entre las curvas de la estación telemétrica y la curva de lluvia estimada con constante de ajuste.

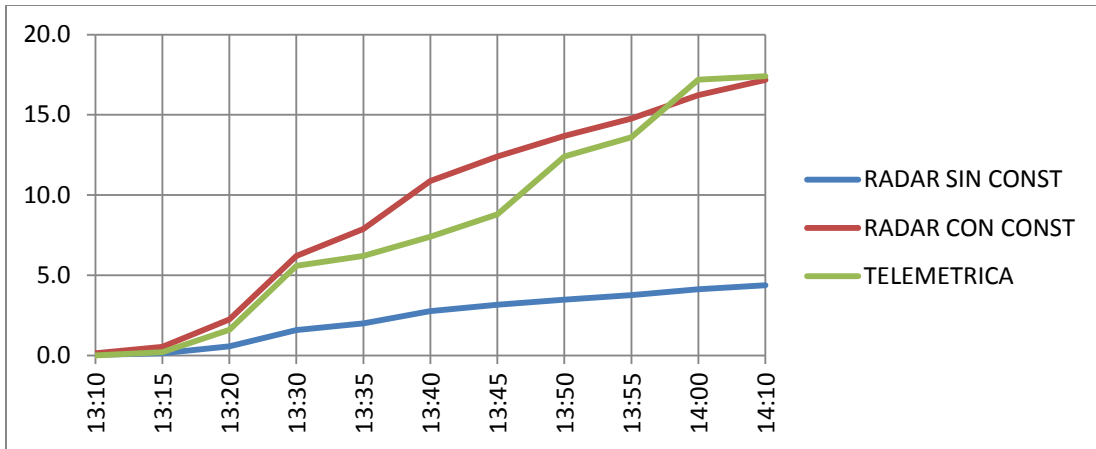


Grafico 3.3.3.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 13:10 y 14:10.

En la gráfica de dispersión 3.3.3.2 se observa la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación del Boquerón para el día 11 de Agosto de 2013.

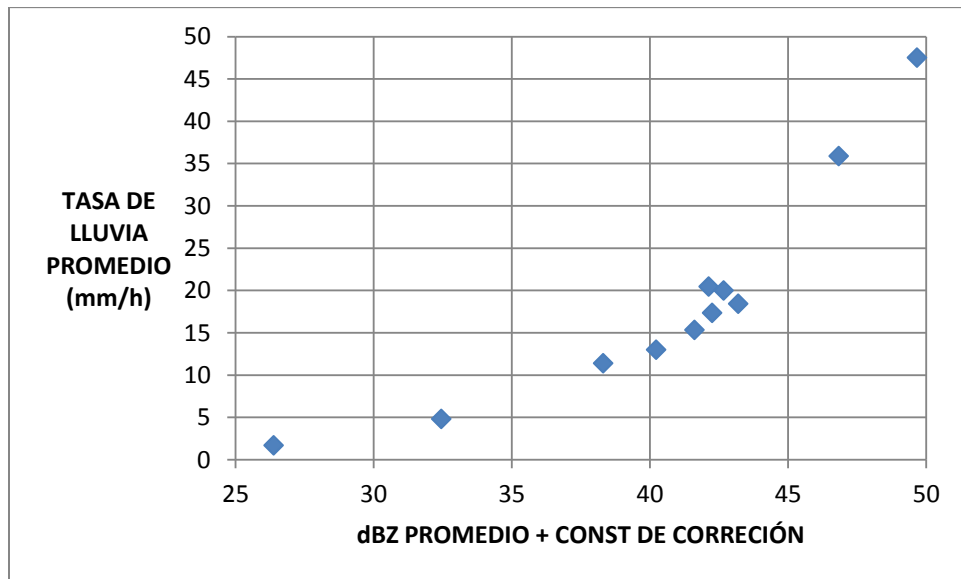


Grafico 3.3.3.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.4 CASO 4: 15 DE AGOSTO DE 2013

En las imágenes satelitales infrarrojas de la figura 3.3.4.1 se observa la línea de inestabilidad que se desplazó sobre El Salvador la noche del 15 de Agosto de 2013, entre las 19:00 del 15 de Agosto y 01:00 horas del 16 de Agosto. Las lluvias analizadas en este caso para la estación de Belloso se registraron entre las 22:00 y 24:00 horas del 15 de Agosto.

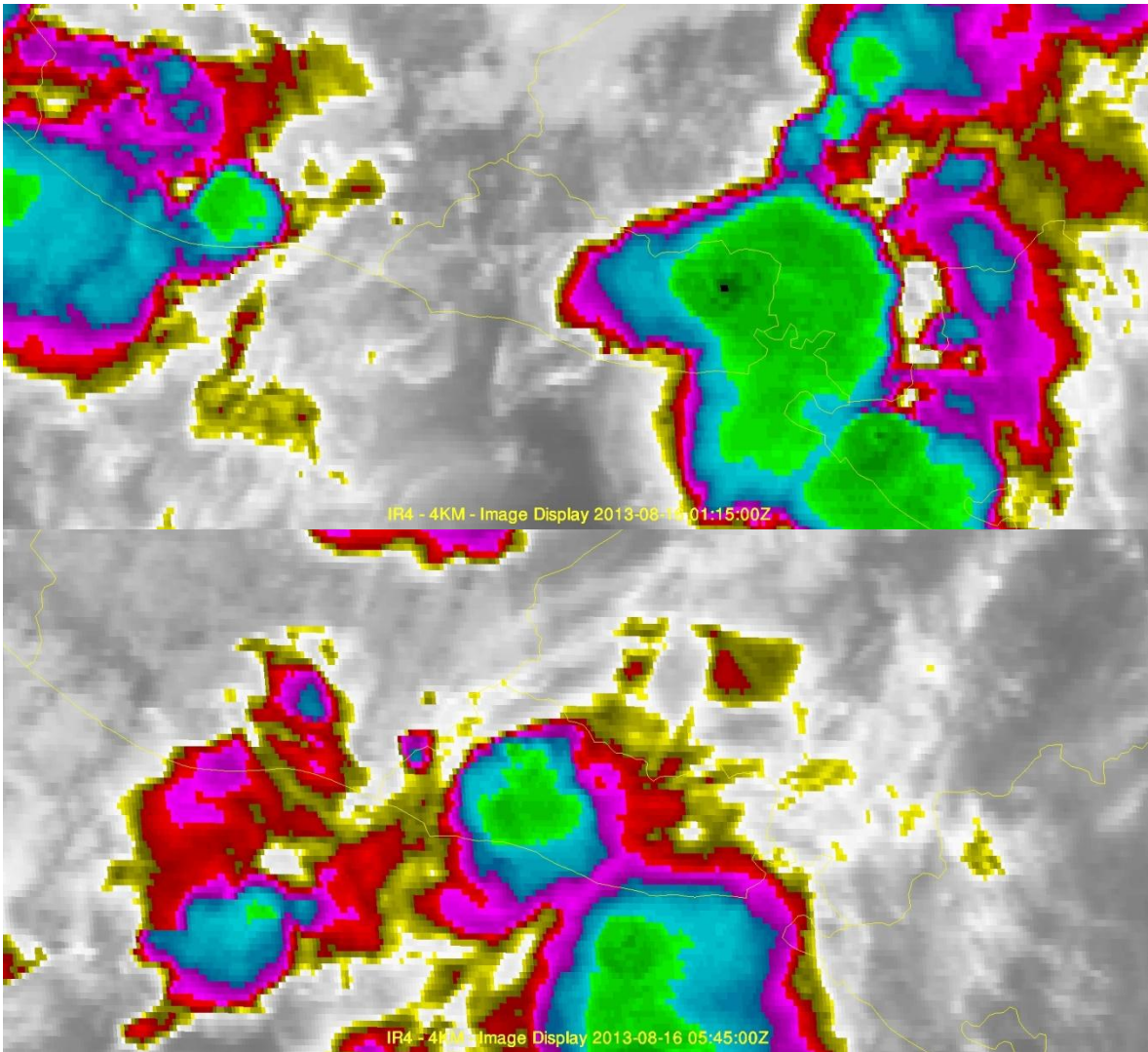


Figura3.3.4.1: Imágenes satelitales infrarrojas. Orden descendente: Imagen: 19:15 (hora local), imagen 23:45 (hora local).

En la figura 3.3.4.2 se presentan dos imágenes de radar donde se observan las lluvias analizadas para este caso.



Figura 3.3.4.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 22:00 y 23:45 horas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los datos para la estación de Boquerón para el 15 de Agosto de 2013.

## BELLOSO

En la tabla 3.3.4.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Boquerón y la estimada por medio de reflectividad de radar. Se puede observar que la lluvia acumulada

estimada utilizando la constante de ajuste es muy cercana al valor medido por la estación telemétrica de Belloso.

Tabla 3.3.4.1: Lluvia acumulada entre las 22:50 y las 24:00 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
22:50	0	0	0
23:00	0.015263517	0.099118479	0.2
23:10	0.789897723	5.129450718	0.6
23:20	1.620268478	10.52172588	8.2
23:30	1.960857374	12.73344761	12.4
23:40	2.097752348	13.62241843	14.6
23:50	2.15932408	14.02225394	15.2
00:00	2.212595021	14.36818565	15.2

En la gráfica 3.3.4.1 se observan las curvas de lluvia acumulada de la estación de Belloso y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 22:50 y 24:00 horas.

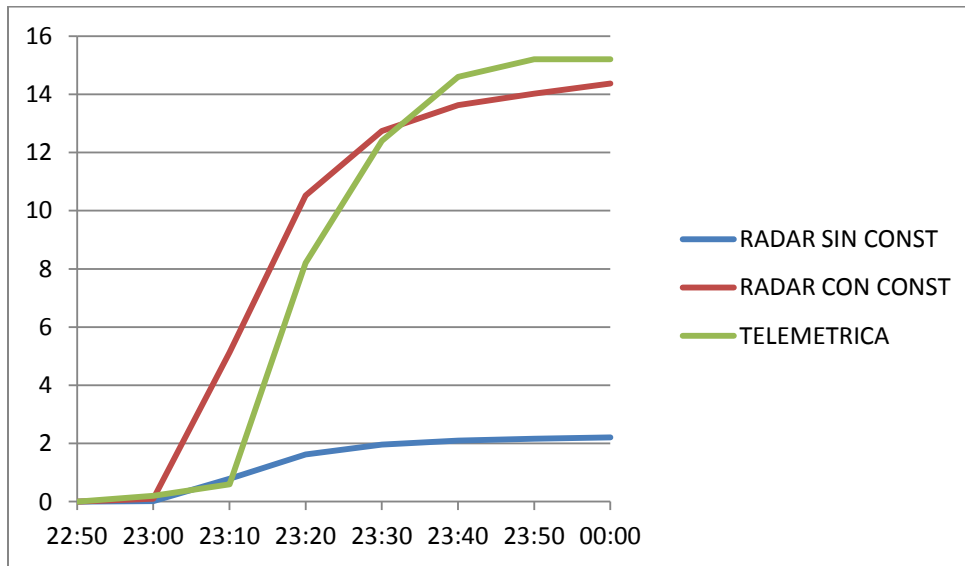


Grafico 3.3.4.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 22:50 y 24:00 horas.

En la gráfica de dispersión 3.3.4.2 se observa la de reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Belloso para este estudio de caso.

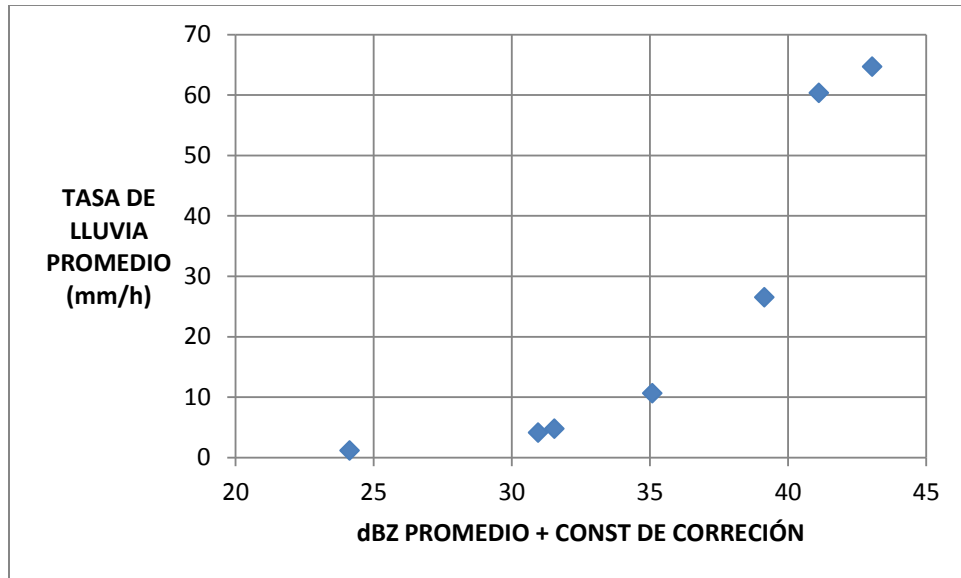


Grafico 3.3.4.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.5 CASO 5: 19 DE AGOSTO DE 2013

En las imágenes satelitales y de radar de las figuras 3.3.5.1 y 3.3.5.2 se observan el campo nuboso convectivo y las lluvias producidas por éste, que se desplazaron sobre el país durante la noche del 19 de Agosto.

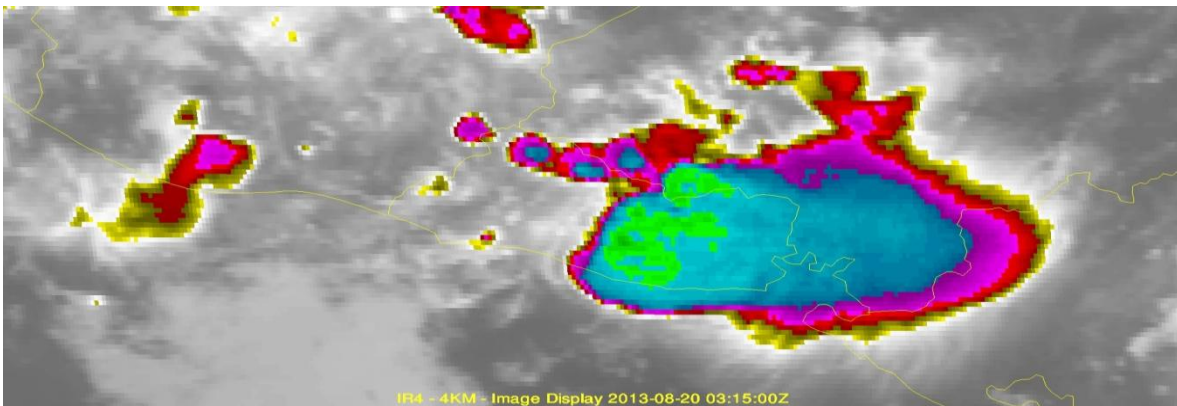




Figura 3.3.5.1: Orden descendente: Imagen satelital infrarroja de las 21:15 horas e imagen de radar de las 21:15 horas.

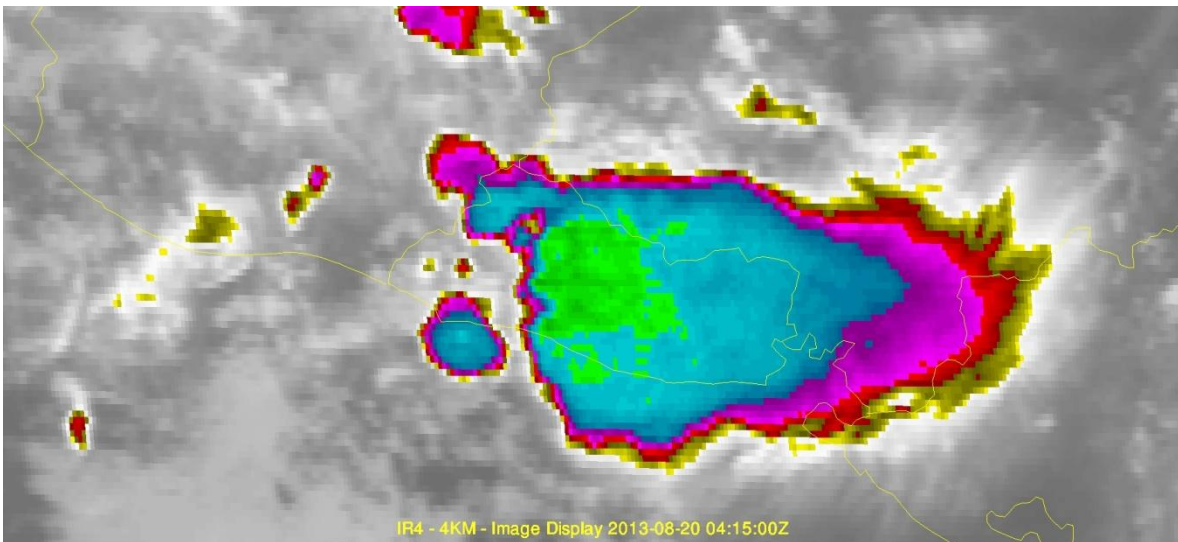


Figura 3.3.5.2: Orden descendente: Imagen satelital infrarroja de las 22:15 horas e imagen de radar de las 22:15 horas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de los datos para la estación de Belloso para este estudio de caso.

## BELLOSO

En la tabla 3.3.5.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Boquerón y la estimada por medio de reflectividad de radar.

Tabla3.3.5.1: Lluvia acumulada entre las 21:50 y las 24:00 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
21:50	0.279104228	1.812451588	0
22:00	1.45720391	9.462814529	8.6
22:10	1.918775669	12.46017675	14.4
22:20	2.056027989	13.3514681	16
22:30	2.188155184	14.20947784	16.8
22:40	2.334593233	15.16041963	17.8
22:50	2.443862389	15.86999346	18.2
23:00	2.518317625	16.35349208	18.4
23:10	2.563548	16.64720983	18.4
23:20	2.640864143	17.14928666	18.6
23:30	2.688117934	17.4561441	18.6
23:40	2.739670412	17.79091642	18.6
23:50	2.803988338	18.20858522	18.8
00:00	2.867281054	18.61959649	18.8

La gráfica 3.3.5.1 presenta las curvas de lluvia acumulada de la estación de Belloso y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 21:50 y 24:00 horas.

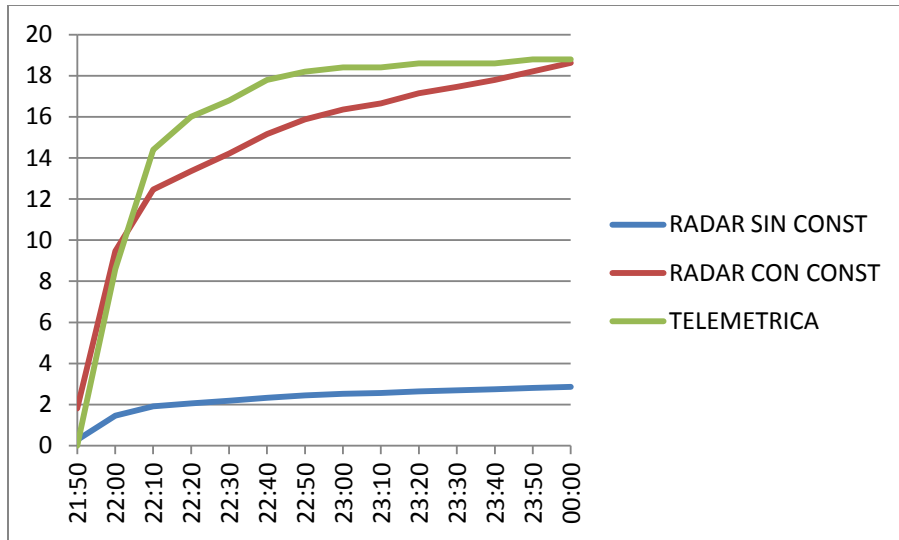


Grafico 3.3.5.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 21:50 y 24:00 horas.

La gráfica de dispersión 3.3.5.2 presenta la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Beloso para este estudio de caso.

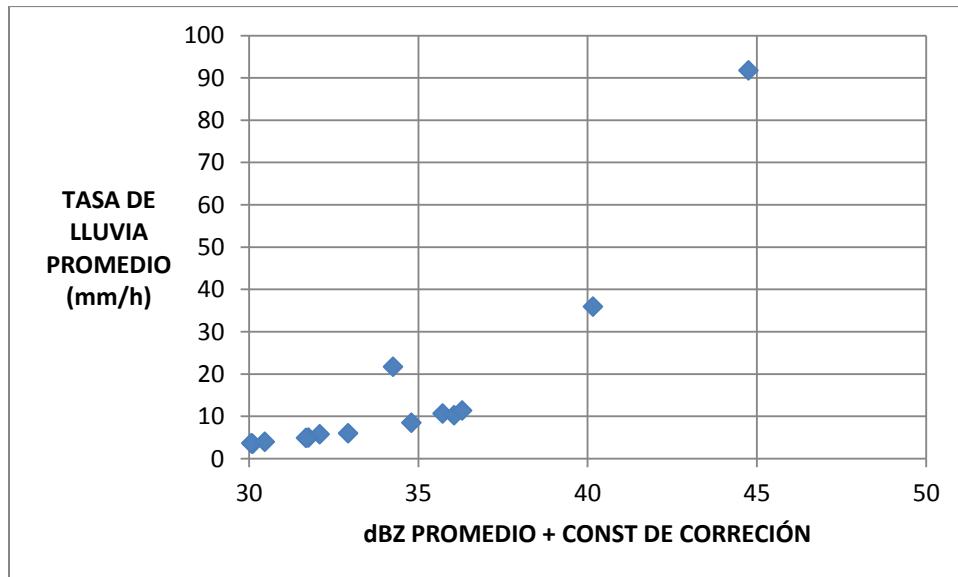


Grafico 3.3.5.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.6 CASO 6: 30 AGOSTO DE 2013

La figura 3.3.6.1 presenta las imágenes satelitales y de radar donde se pueden observar las lluvias analizadas para este caso y los campos nubosos que las produjeron.

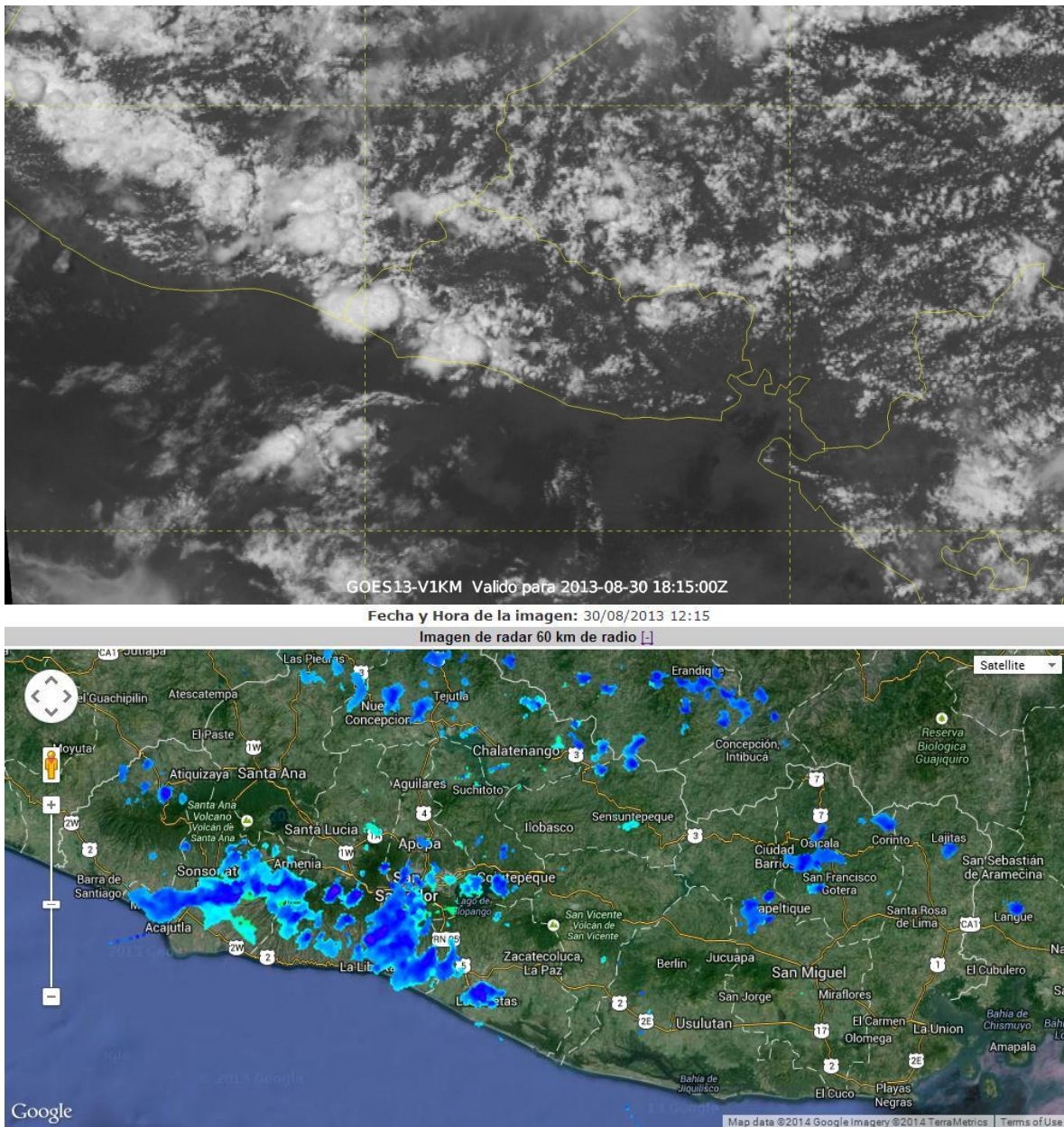


Figura 3.3.6.1: Orden descendente: Imagen satelital visible e imagen de radar, ambas de las 12:15 horas (hora local).

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la estación de PROCAFE para este estudio de caso.

### PROCAFE

En la tabla 3.3.6.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de PROCAFE y la estimada por medio de reflectividad de radar.

Tabla 3.3.6.1: Lluvia acumulada entre las 10:50 y las 14:30 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
10:50	0	0	0
11:00	0.063073518	0.307147549	0
11:10	0.367097647	1.787646327	0.2
11:20	0.412421777	2.008360118	0.4
11:30	0.87245859	4.248590003	0.4
11:40	2.164409946	10.53997355	0.6
11:50	3.371189402	16.4165976	10.8
12:00	4.127375798	20.09897978	22.4
12:10	5.119933178	24.93241188	22.6
12:20	5.329340222	25.95215619	22.8
12:30	6.287197076	30.616608	23.4
12:40	6.502737602	31.66622037	32.4
12:50	6.816359771	33.19345848	34.6
13:00	6.987253477	34.02565533	37.8
13:10	7.015624546	34.16381322	38
13:20	7.053722952	34.34934009	38.2
13:30	7.073506234	34.44567825	38.2
13:40	7.199904157	35.06119509	38.2
13:50	7.251940948	35.31459736	38.2
14:00	7.307054574	35.58298282	38.2
14:10	7.342536457	35.75576807	38.2
14:20	7.376485593	35.92108933	38.2
14:30	7.409708635	36.08287476	38.4

La gráfica 3.3.6.1 presenta las curvas de lluvia acumulada de la estación de PROCAFE y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 10:50 y 14:30 horas.

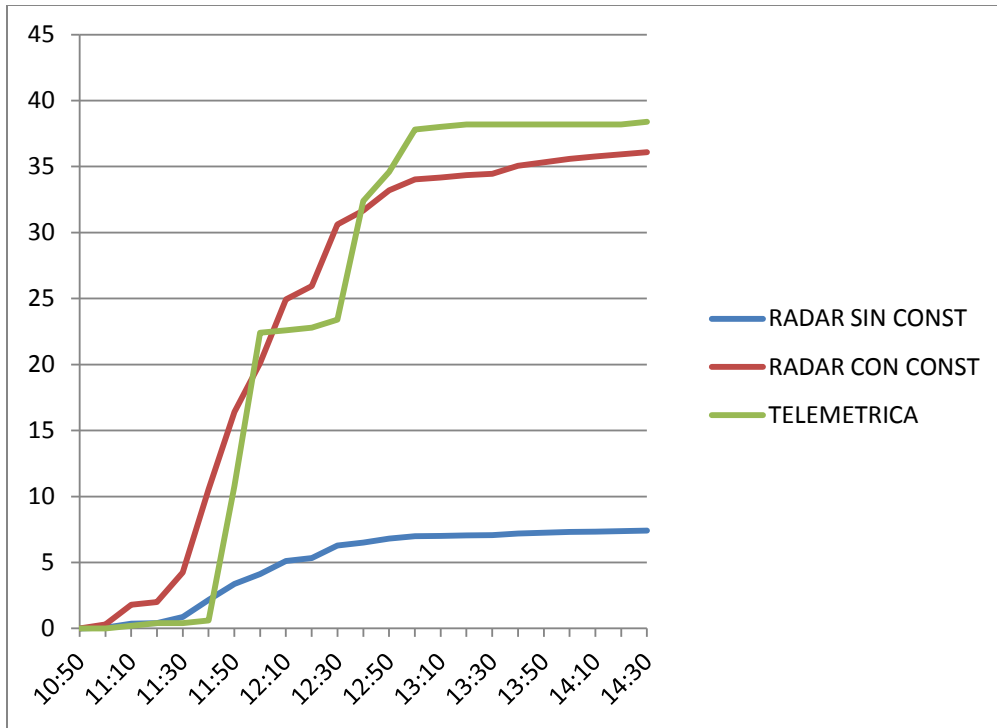


Grafico 3.3.6.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 21:50 y 24:00 horas.

La gráfica de dispersión 3.3.6.2 muestra la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Belloso para este estudio de caso.

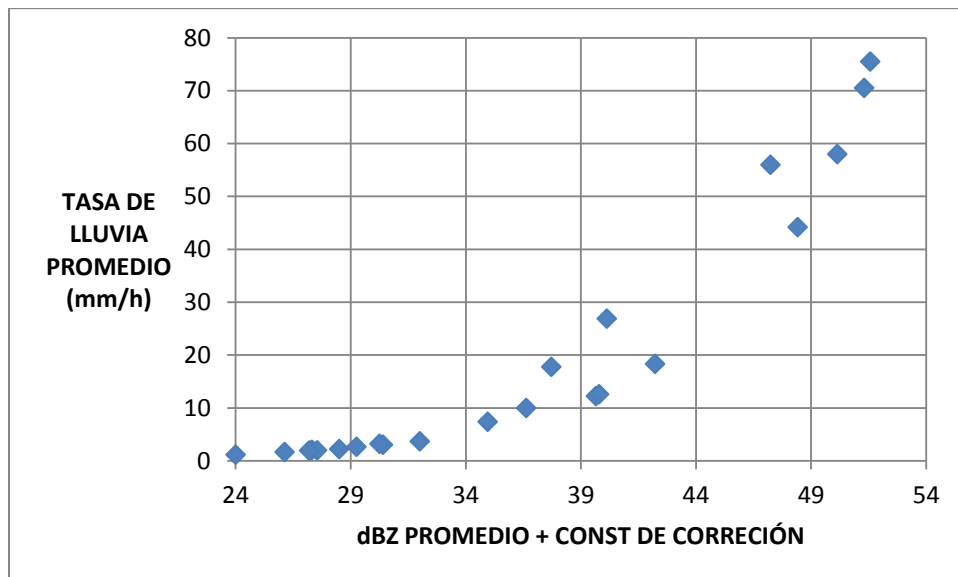


Grafico 3.3.6.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.7 CASO 7: 11 DE SEPTIEMBRE DE 2013

Las figuras que a continuación se presentan muestran las imágenes satelitales y de radar donde se pueden observar las lluvias analizadas para este caso y los sistemas atmosféricos que las produjeron.

En la imagen satelital de vapor de agua (ver figura 3.3.7.1) se puede observar la humedad asociada a un sistema de baja presión ubicado frente a las costas pacíficas de México, específicamente frente al Istmo de Tehuantepec, el cual contribuyó el aporte de abundante humedad desde El Pacífico hacia las costas salvadoreñas y demás territorio. Este sistema evolucionó en el período del 13 al 20 de Septiembre a Depresión Tropical, Tormenta Tropical y finalmente se transformaría en Huracán Manuel.

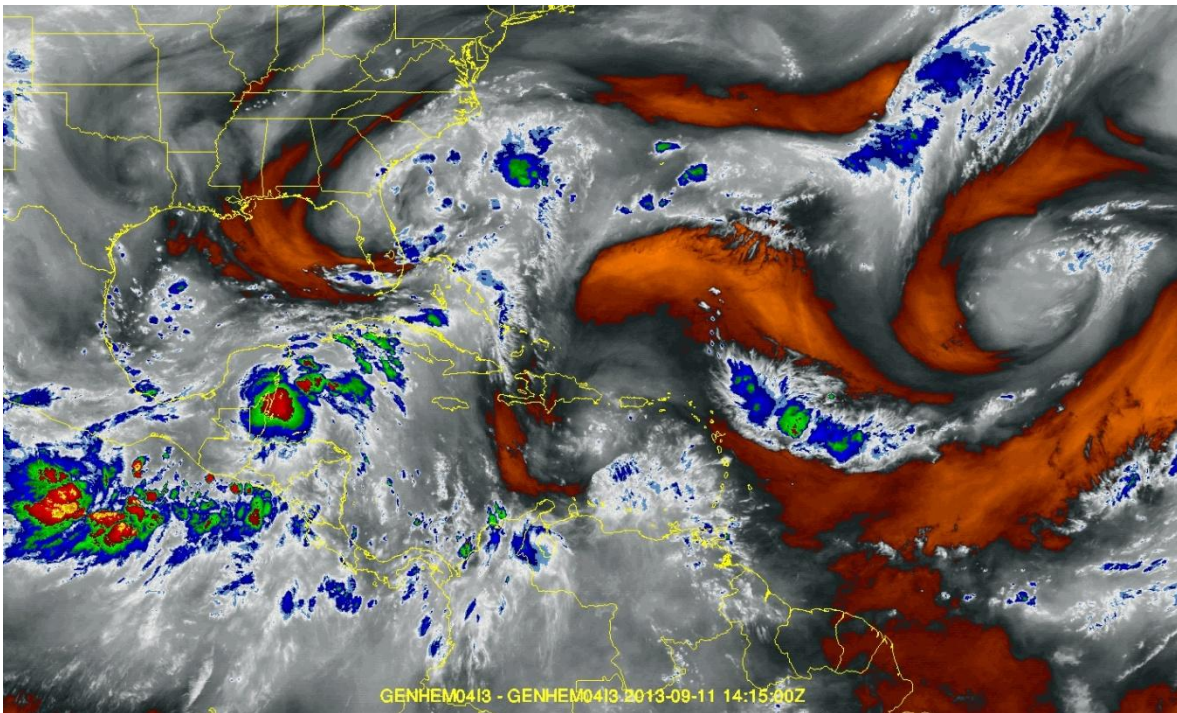


Figura 3.3.7.1: Imagen satelital de vapor de agua de las 08:15 horas (hora local) del 11-09-2013.

Se sumo la influencia o arrastre de humedad desde el Océano Pacífico producido por el acercamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) a las Costas Pacíficas de Centroamérica como se puede observar en las figuras 3.3.7.1 y 3.3.7.2. También cabe mencionar

que se contaba con otro sistema de baja presión sobre la península de Yucatán que se catalogaría como Huracán Ingrid a partir del 12 de Septiembre (ver figuras 3.3.7.1 y 3.3.7.2).

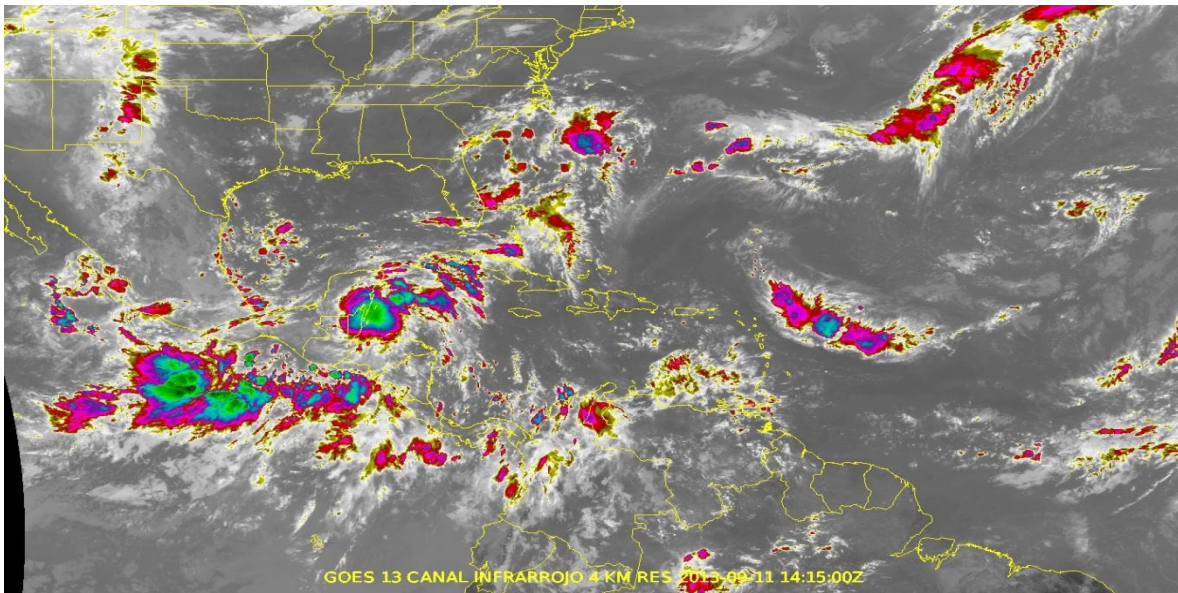
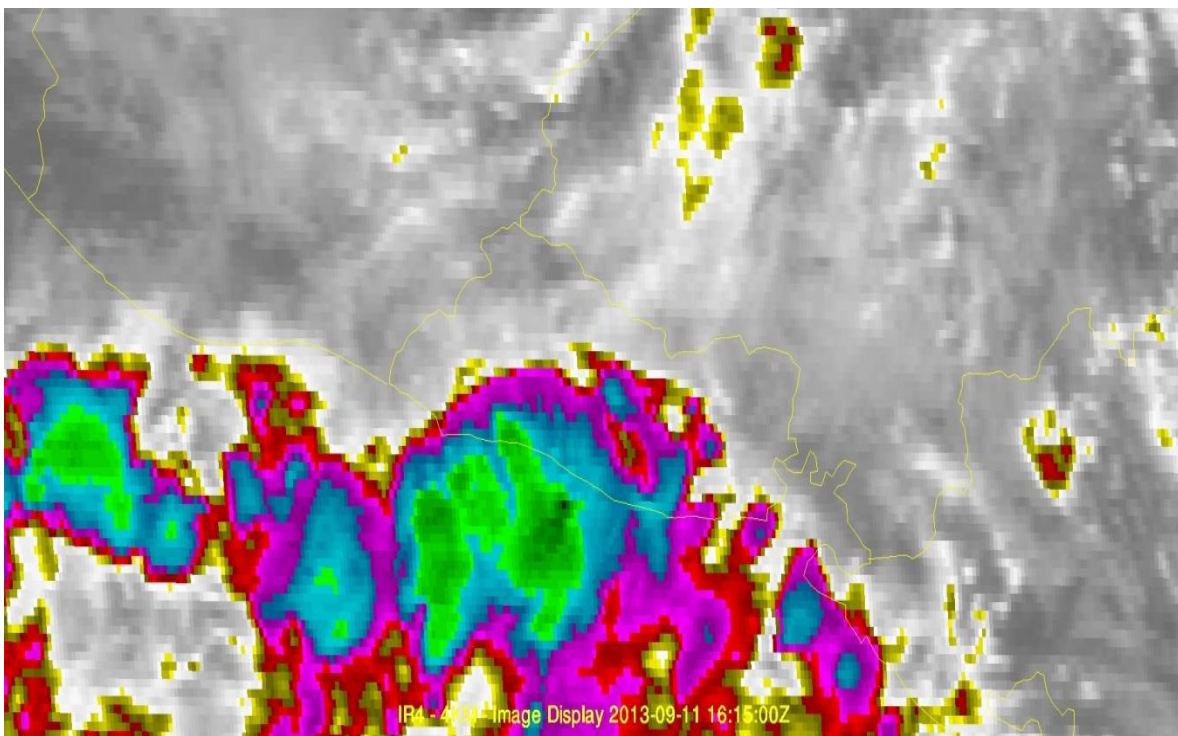
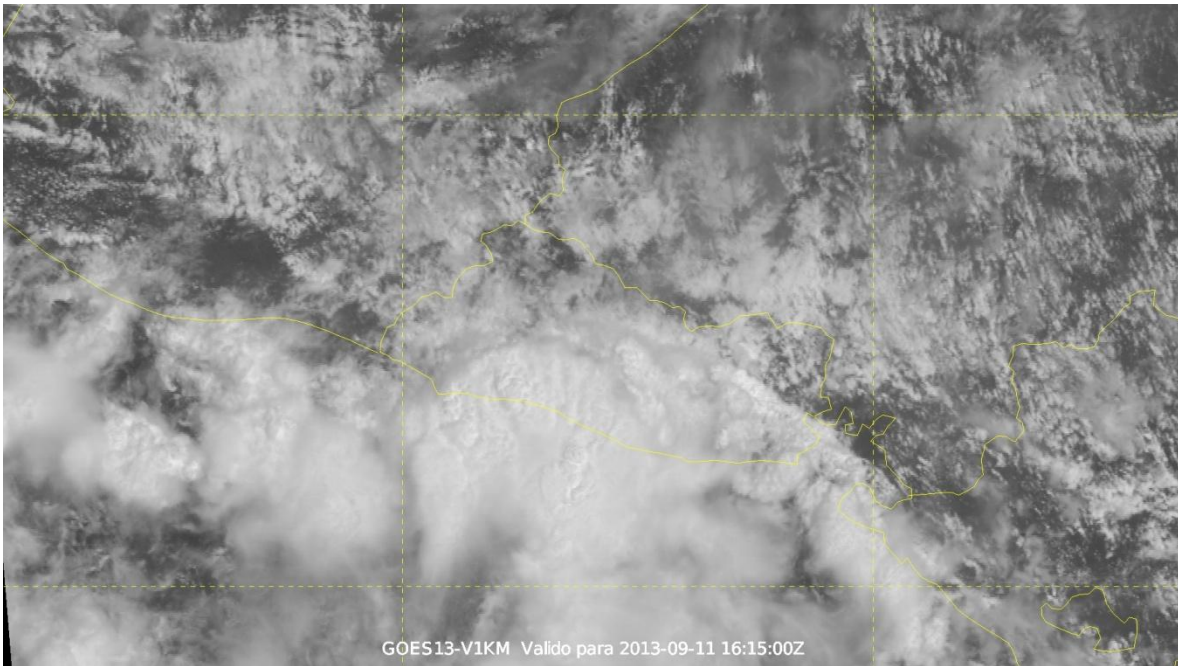


Figura 3.3.7.2: Imagen satelital infrarroja de las 08:15 horas (hora local) del 11-09-2013.

En las siguientes imágenes (ver figuras 3.3.7.3 y 3.3.7.4) de radar y de satélite se podrá observar los campos nubosos y las lluvias producidas por éstos sistemas atmosféricos regionales sobre El Salvador.



Figura 3.3.7.3: Imagen de radar de las 10:15 horas del 11-09-2013.



*Figura 3.3.7.4: Orden descendente: Imagen satelital visible e imagen satelital infrarroja de las 10:15 horas (hora local).*

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la estación de Ilopango para este estudio de caso.

## ILOPANGO

En la tabla 3.3.7.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Ilopango y la estimada por medio de reflectividad de radar entre las 09:40 y 14:30 horas.

Tabla 3.3.7.1: Lluvia acumulada entre las 09:40 y las 14:30 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
09:40	0	0	0
09:50	0.494527669	2.780933447	8
10:00	0.659006308	3.705864804	10.6
10:10	0.858538366	4.827916026	11.8
10:20	0.914545208	5.14286564	12
10:30	0.950919957	5.347415886	12.2
10:40	1.004868312	5.650789782	12.4
10:50	1.092076392	6.141196853	12.4
11:00	1.184255536	6.659558274	12.4
11:10	1.296225495	7.289211624	13
11:20	1.437677313	8.084653653	15.2
11:30	1.899821726	10.68348267	16.8
11:40	2.479461422	13.94303622	16.8
11:50	2.929045888	16.47123546	20.2
12:00	3.251389584	18.28390727	23.2
12:10	3.389975507	19.06323319	24.8
12:20	3.73419105	20.99889944	26.8
12:30	3.898628714	21.92360037	27.6
12:40	4.055511516	22.8058172	28.2
12:50	4.22213477	23.74280861	28.8
13:00	4.461543948	25.08910536	29.2
13:10	4.665445873	26.23573015	30.2
13:20	4.795222724	26.96551901	30.6
13:30	4.976550354	27.98519921	30.8
13:40	5.272235885	29.64796114	31.6
13:50	5.419318501	30.47506747	32
14:00	5.571807221	31.33257456	32.2
14:10	5.65083713	31.7769924	32.2
14:20	5.65083713	31.7769924	32.4
14:30	5.65083713	31.7769924	32.4

La gráfica 3.3.7.1 presenta las curvas de lluvia acumulada de la estación de Ilopango y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 09:40 y 14:20 horas.

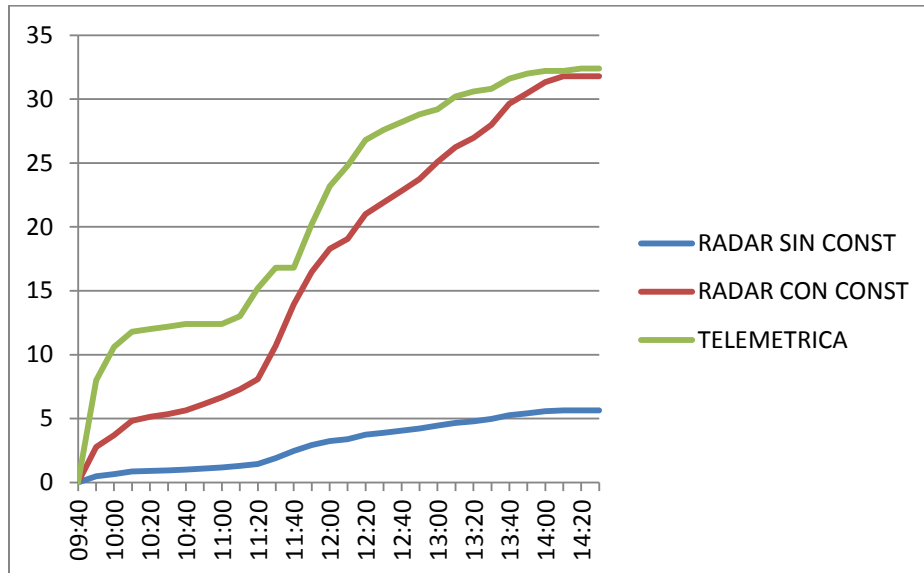


Grafico 3.3.7.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 09:40 y 14:30 horas.

La gráfica de dispersión 3.3.7.2 muestra la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Ilopango para este estudio de caso.

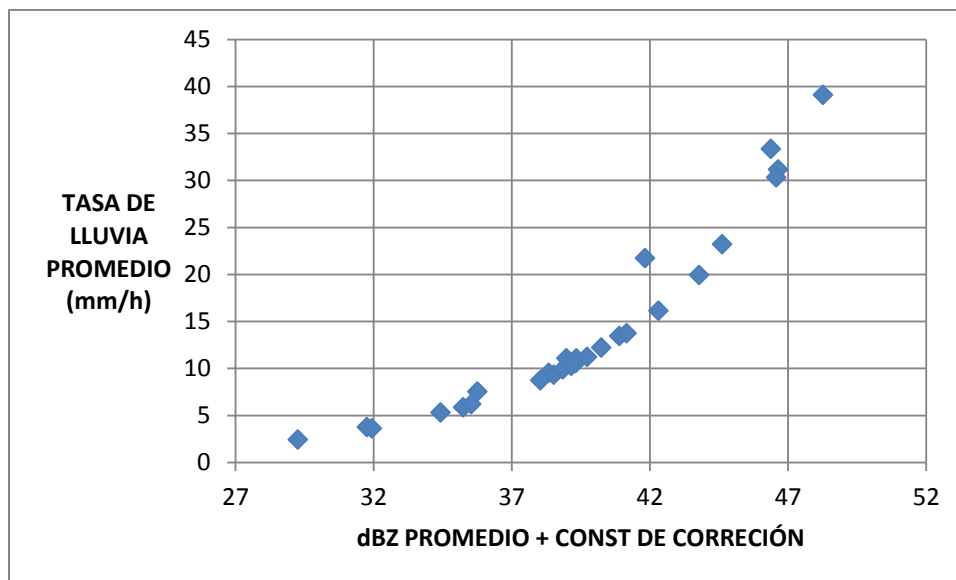
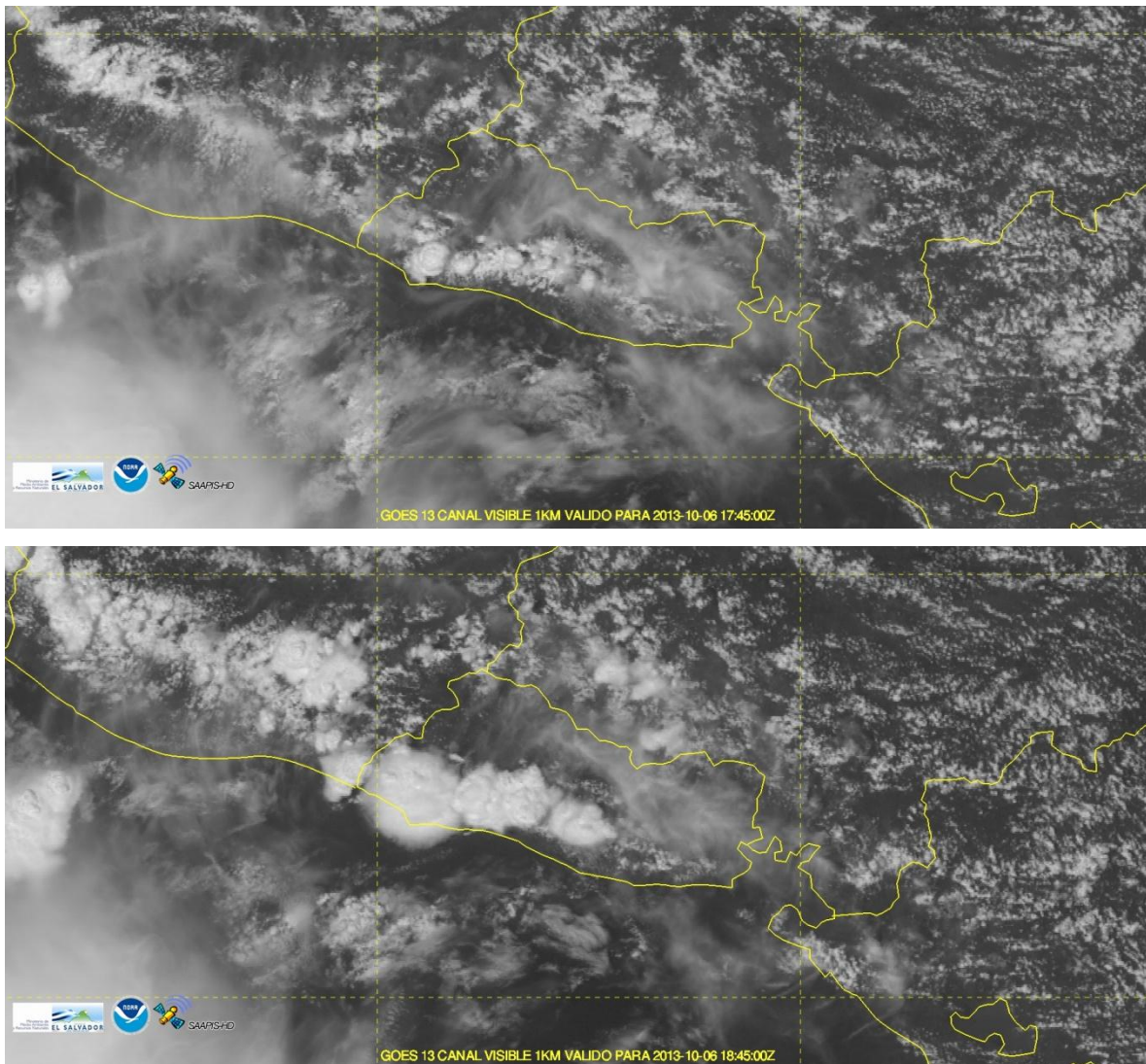


Grafico 3.3.7.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.8 CASO 8: 06 DE OCTUBRE DE 2013

La figura 3.3.8.1 presenta dos imágenes satelitales visibles donde se pueden observar el desarrollo de núcleos de convección que se desarrollaron a lo largo de la Cadena Volcánica de El Salvador con mayor énfasis en la zona central y occidental del país.



*Figura 3.3.8.1: Imágenes satelitales visibles. Orden descendente: 11:45 y 12:45 horas (hora local).*

Estos sistemas nubosos produjeron precipitaciones de tipo dispersas de moderada a fuerte intensidad sobre la Cordillera Volcánica central y occidental, como se puede observar en las siguientes imágenes de radar (fig. 3.3.8.2):



Figura 3.3.8.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 11:45 y 12:45 horas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la estación de Boquerón para este estudio de caso.

## BOQUERÓN

En la tabla 3.3.8.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Boquerón y la estimada por medio de reflectividad de radar entre las 12:40 y 14:10 horas.

Tabla 3.3.8.1: Lluvia acumulada entre las 12:40 y las 14:10 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
12:40	0.1	0.4	1.4
12:50	0.1	0.7	1.8
13:00	0.3	2.3	2.0
13:10	0.5	4.1	3.4
13:20	0.6	4.8	4.4
13:30	0.7	5.5	5.0
13:40	0.7	6.1	6.2
13:50	0.8	6.4	6.6
14:00	0.8	6.6	6.8
14:10	0.8	6.6	6.8

La gráfica 3.3.8.1 presenta las curvas de lluvia acumulada de la estación de Boquerón y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 12:40 y 14:10 horas.

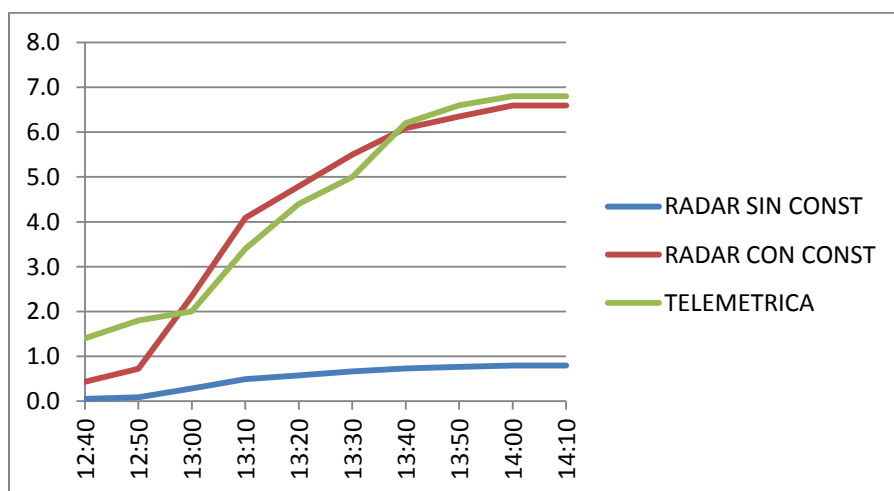


Grafico 3.3.8.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 12:40 y 14:10 horas.

La gráfica de dispersión 3.3.8.2 muestra la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Boquerón para este estudio de caso.

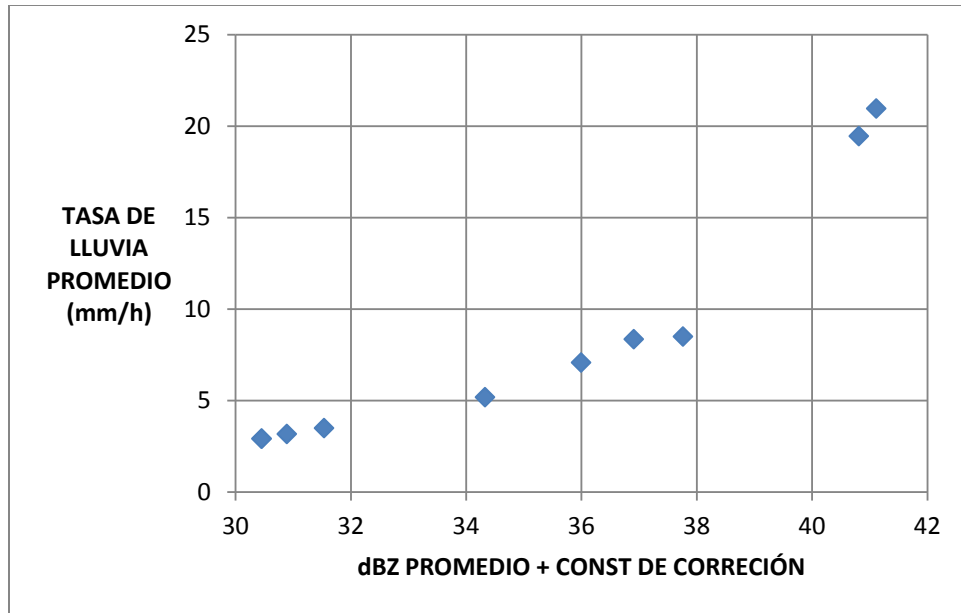


Grafico 3.3.8.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.9 CASO 9: 11 DE OCTUBRE DE 2013

La figura 3.3.9.1 presenta una imagen satelital infrarroja de la noche del 11 de Octubre de 2013 donde se puede observar el paso de una Onda Tropical sobre la región centroamericana.

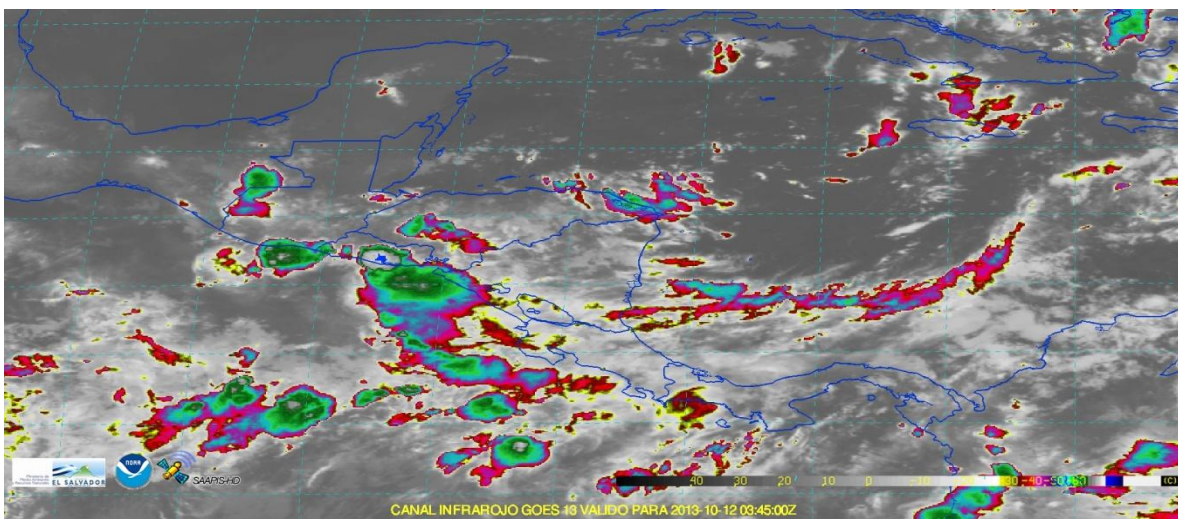


Figura 3.3.9.1: Imagen satelital infrarroja de las 21:45 horas (hora local).

El paso de este sistema atmosférico produjo desarrollo convectivo sobre El Salvador, como se puede ver en la imagen satelital infrarroja de la figura 3.3.9.2, provocando lluvias dispersas de moderada a fuerte sobre el territorio.

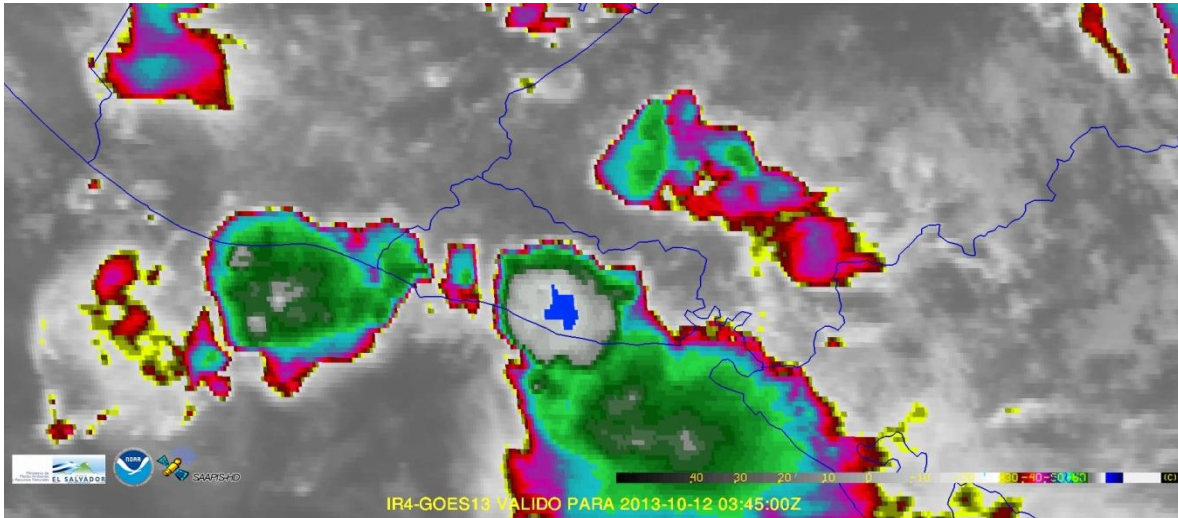


Figura 3.3.9.2: Imagen satelital infrarroja de las 21:45 horas (hora local).

Las siguientes imágenes de radar muestran las lluvias producidas sobre el territorio por el paso de esta onda tropical (ver figuras 3.3.9.3 y 3.3.9.4).



Figura 3.3.9.3: Imagen de radar de las 21:45 horas.



Figura 3.3.9.4: Imagen de radar de las 22:45 horas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la estación de Boquerón para este estudio de caso.

## BOQUERÓN

En la tabla 3.3.9.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Boquerón y la estimada por medio de reflectividad de radar entre las 19:30 y 24:00 horas.

Tabla 3.3.9.1: Lluvia acumulada entre las 19:30 y las 24:00 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:30	0	0	0
19:40	0.02198113	0.471302786	0.6
19:50	0.05997151	1.285863934	8
20:00	0.08999994	1.929699135	9.6
20:10	0.22081409	4.734528992	15
20:20	0.42795634	9.175916741	15
20:30	0.48410881	10.37989554	15
20:40	0.83677963	17.94159713	15.4
20:50	1.07499364	23.04920208	26.4
21:00	1.11157608	23.83357505	31
21:10	1.31238104	28.13908337	31.2
21:20	1.44318019	30.94358001	31.2
21:30	1.48809775	31.90666854	31.2
21:40	1.57037016	33.67069144	31.2
21:50	1.59968247	34.2991838	31.4
22:00	1.59968247	34.2991838	33.6
22:10	1.64398287	35.24903961	35.4
22:20	1.67782768	35.97471441	36.8
22:30	1.71437975	36.75843632	37.6
22:40	1.75335993	37.59421999	38.2
22:50	1.75335993	37.59421999	43.2
23:00	1.84424833	39.54298041	44.6
23:10	1.98011114	42.45604809	45.8
23:20	2.0989337	45.00375187	46
23:30	2.14100035	45.90571311	46.2
23:40	2.14100035	45.90571311	46.2
23:50	2.14100035	45.90571311	46.4
00:00	2.17468568	46.62796849	46.4

La gráfica 3.3.9.1 presenta las curvas de lluvia acumulada de la estación de Boquerón y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 19:30 y 24:00 horas.

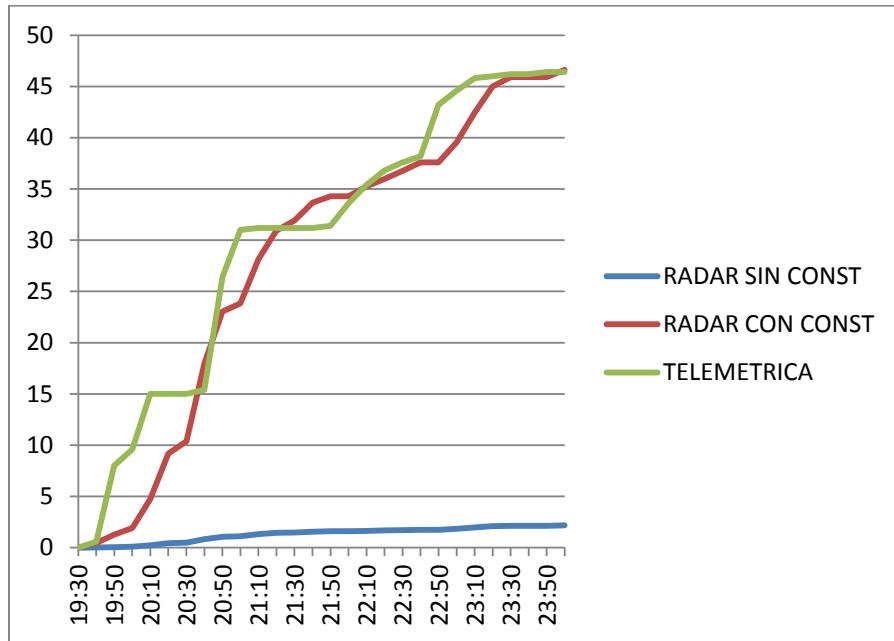


Grafico 3.3.9.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 19:30 y 23:50 horas.

La gráfica de dispersión 3.3.9.2 muestra la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Boquerón para este estudio de caso.

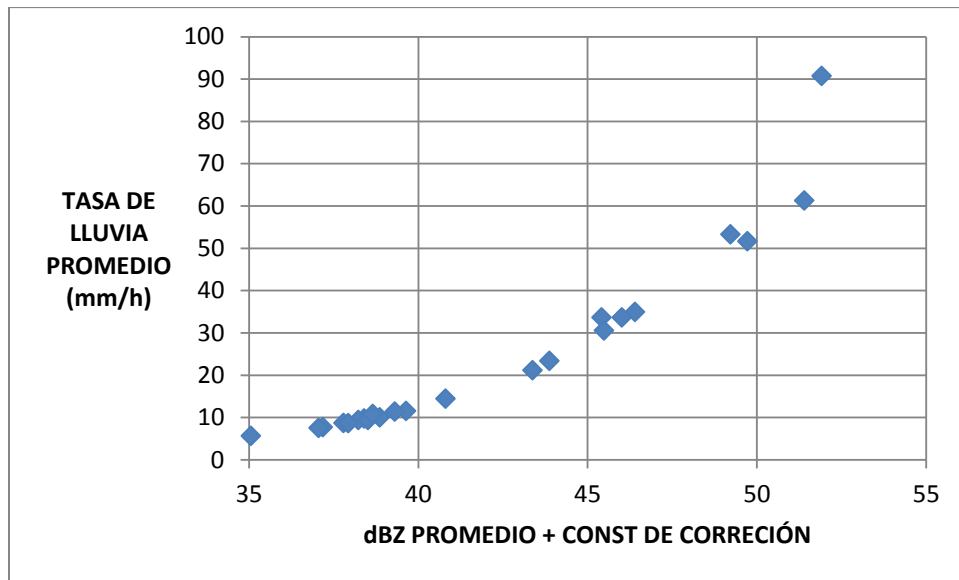


Grafico 3.3.9.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.3.10 CASO 10: 14 DE NOVIEMBRE DE 2013

En las imágenes satelitales infrarrojas de la figura 3.3.10.1 se observa el desplazamiento de un núcleo convectivo que se desarrolló en la zona central del país y se desplazó hacia el occidente provocando las lluvias sucedidas en la noche del 14 de Noviembre de 2013.

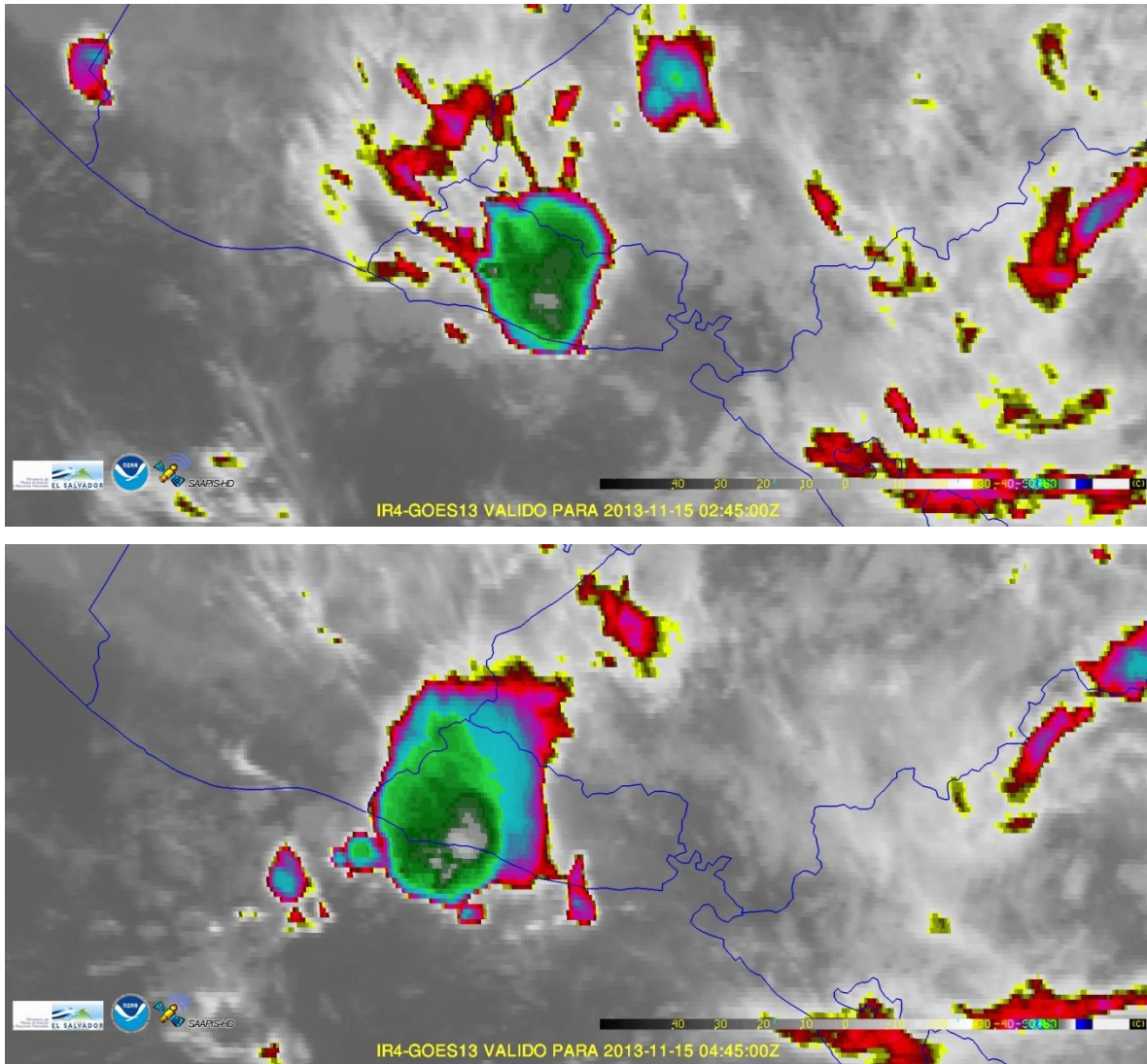


Figura 3.3.10.1: Imágenes satelitales infrarrojas. Orden descendente: 20:45 y 22:45 horas (hora local).

A continuación se presentan dos imágenes de radar donde se pueden observar las lluvias provocadas por este sistema y analizadas para este estudio de caso.



Figura 3.3.10.2: Imágenes de radar. Orden descendente: 20:45 y 22:45 horas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para la estación de Ilopango para este estudio de caso.

## ILOPANGO

En la tabla 3.3.10.1 se muestra la lluvia acumulada según la estación telemétrica de Ilopango y la estimada por medio de reflectividad de radar entre las 20:00 y 22:50 horas.

Tabla 3.3.10.1: Lluvia acumulada entre las 20:00 y las 22:50 horas.

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:00	0	0	0
20:10	0	0	0
20:20	0.1654041	2.205699118	0.2
20:30	0.394003067	5.254115347	0.4
20:40	1.788895573	23.85530586	7.2
20:50	1.928971621	25.72324999	21.2
21:00	1.928971621	25.72324999	27.2
21:10	1.928971621	25.72324999	30.2
21:20	1.928971621	25.72324999	32.4
21:30	1.999652821	26.66579894	32.6
21:40	2.096215687	27.95348545	32.8
21:50	2.154540792	28.73126323	33.2
22:00	2.213035273	29.51129967	33.4
22:10	2.263505864	30.18433582	33.4
22:20	2.313147407	30.84631643	33.6
22:30	2.379683017	31.73358305	33.6
22:40	2.442633463	32.57304074	33.8
22:50	2.48979127	33.2019002	34

La gráfica 3.3.10.1 presenta las curvas de lluvia acumulada de la estación de Ilopango y la lluvia acumulada estimada por radar entre las 20:00 y 22:50 horas.

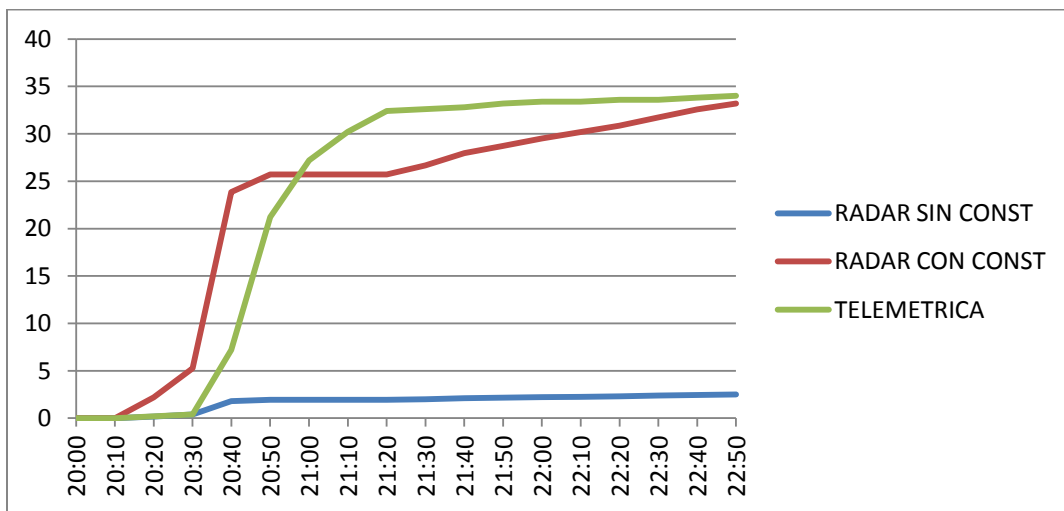


Gráfico 3.3.10.1: Curvas de lluvia acumulada entre las 20:00 y 22:50 horas.

La gráfica de dispersión 3.3.10.2 muestra la reflectividad (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h) para la estación de Ilopango para este estudio de caso.

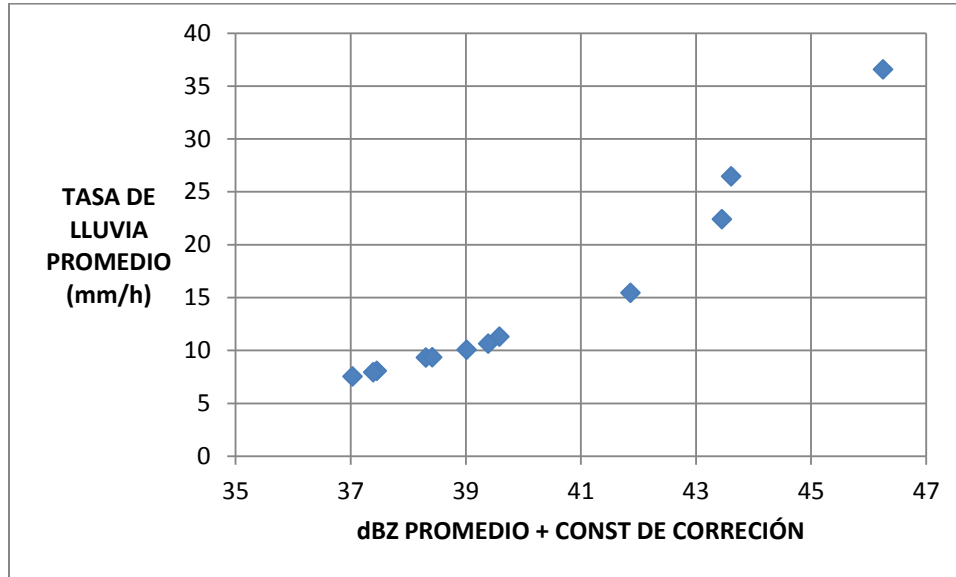


Gráfico 3.3.10.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 3.4 CONSTANTES DE AJUSTE Y RANGOS DE INTENSIDAD DE LLUVIA VS REFLECTIVIDAD

Se utilizó constantes de ajuste para lograr una mejor estimación de intensidad de lluvia a partir de los datos de reflectividad del radar, ya que los datos obtenidos y procesados sin dichas constantes subestimaban en gran medida la intensidad de las lluvias; esto debido probablemente a que la calibración inicial del proveedor de los radares no consideraba lluvias de fuerte intensidad como las que ocurren en latitudes tropicales como las de nuestro país.

En la tabla 3.4.1 se presentan todas las constantes de ajuste utilizadas para cada estudio de caso y para cada estación, y de esta manera lograr mejores estimaciones de intensidad de lluvia. Las casillas en blanco que no muestran constantes es debido a que esa estación no obtuvo registro de lluvia para el caso determinado. También se muestran las constantes promedio para cada estación, estas sirvieron para encontrar una constante promedio general para el radar de San

Salvador; esto debido a que cuando se realice una nueva calibración para este radar sólo podrá utilizarse una constante de ajuste y no una para cada estación.

Tabla 3.4.1: Constantes de ajuste, constantes promedio para cada estación y constante promedio general.

CASOS	ILOPANGO	BELLOSO	BOQUERÓN	PROCAFE	PICACHO	LA CIMA	TONACATEPEQUE	APOPA	PROMEDIO
18/07/2013	14	15	15	9	12	13	14.5	11	
29/07/2013		16	15			14.7			
11/08/2013	12	18.5	9.5				15	15.5	
15/08/2013		13		9	14	18	15	16.5	
19/08/2013		13	9.5		17	12			
30/08/2013				11					
02/09/2013				3					
03/09/2013		17							
11/09/2013	12			15		15.5	13	13.5	
06/10/2013		11.2	14.7		13.5				
11/10/2013	7	12		15	13			10.3	
14/11/2013	18			17.5					
<b>CONSTANTES PROMEDIO</b>	<b>12.6</b>	<b>14.4625</b>	<b>12.74</b>	<b>11.35714</b>	<b>13.9</b>	<b>14.64</b>	<b>14.375</b>	<b>13.36</b>	<b>13.43</b>

Con la constante de ajuste promedio encontrada (**13.43**) se realizó un nuevo procesamiento de todos los datos de cada estación y para todos los estudios de caso, y se estimó la intensidad de lluvia en (mm/h) a partir de los valores de reflectividad (dBz). En la gráfica 3.4.1 se presenta la curva obtenida para los cálculos realizados utilizando la constante de ajuste promedio. En ella se puede observar una curva con tendencia muy bien definida y con poca dispersión por lo que podrá establecerse rangos de intensidad de lluvia a partir de los datos de radar con un margen de error muy aceptable.

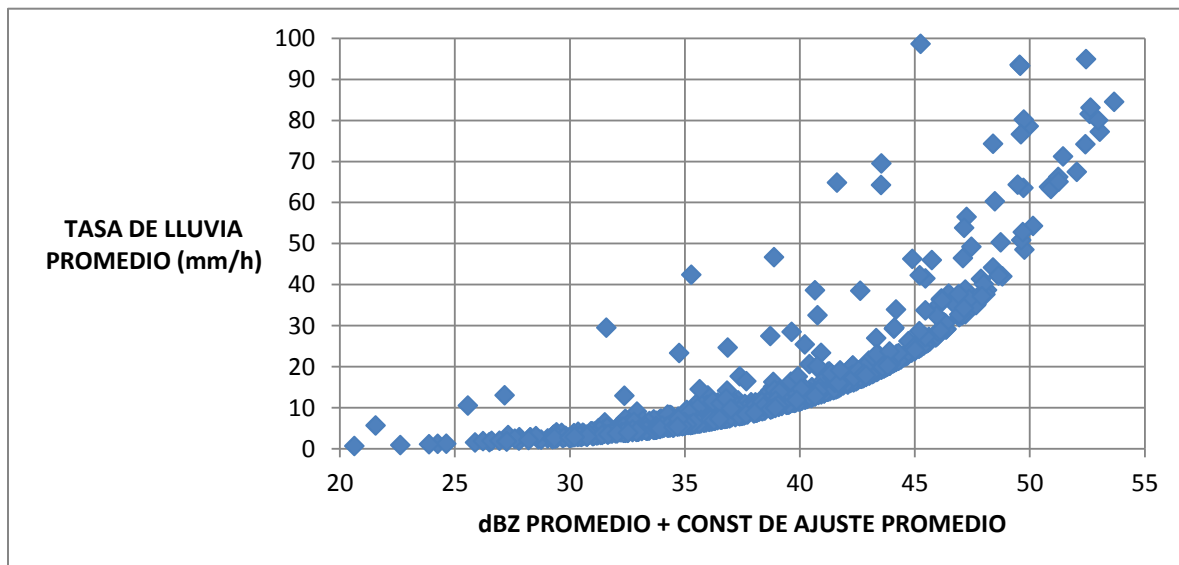


Gráfico 3.4.1: Curva refleja la cantidad de Dbz promedio y la tasa de lluvia para todos los estudios de casos.

También se puede observar en la gráfica 3.4.1 que la mayor sensibilidad de detección de nuestro radar se encuentra en el rango desde los 20 dBz hasta 55 dBz a pesar que la escala completa vaya desde 0 dBz hasta 63.9 dBz. En cuanto a la intensidad de lluvia podemos observar que es posible estimar desde 0 a 100 mm/h. Cabe mencionar que se encontraron menos de cinco puntos fuera de los límites mencionados por lo que no son significativos y la gráfica pudo ser acotada entre estos límites. También es importante destacar que la sensibilidad del radar y la intensidad de lluvia que puede medir se adaptan muy bien a la realidad nacional, ya que las lluvias ocurridas en nuestro país presentan intensidades desde 0 a 60 mm/h principalmente y mayores a 60 mm/h de manera ocasional.

Para verificar la confiabilidad de la curva obtenida en la gráfica 3.4.1, se calculó la línea de tendencia o curva de mejor ajuste para dicha gráfica. Utilizando un ajuste o regresión polinomial de grado 5 se obtuvo un valor del *Coefficiente de Determinación* ( $R^2$ ) de **0.8478** y un valor de **0.9207** para el *Coefficiente de Correlación* ( $R$ ). Cuando los valores para  $R^2$  y  $R$  son de 1 o cercanos a 1 significa que nuestra curva de ajuste es confiable y por lo tanto nuestra curva experimental también lo es. Con un Coeficiente de Correlación de 0.9207 podemos decir que la correlación entre Reflectividad (dBz) vs Intensidad de Lluvia (mm/h) para los datos analizados es muy buena.

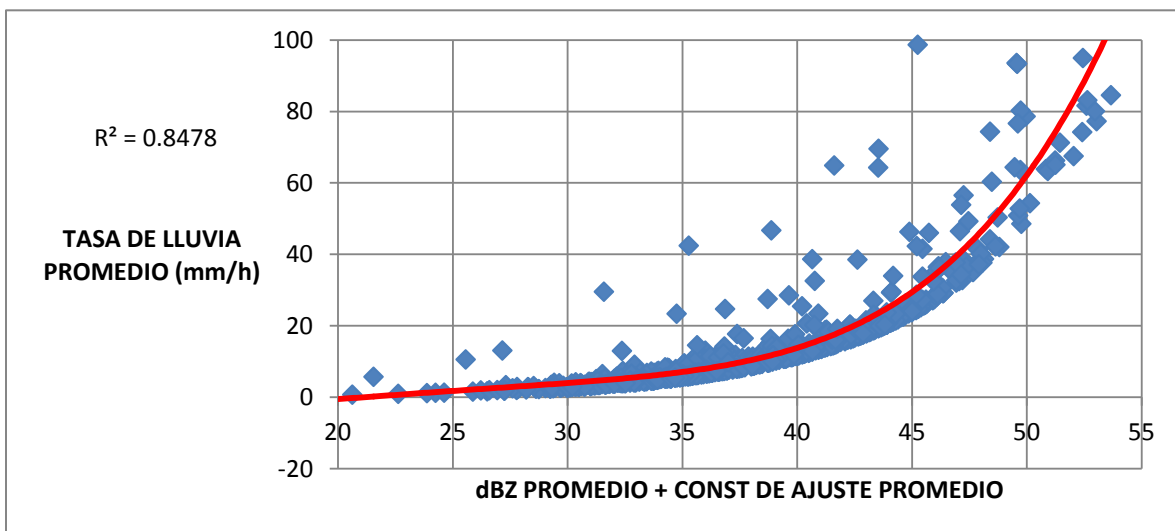


Grafico 3.4.2: Línea de tendencia o mejor ajuste para la curva de dBz vs tasa de lluvia.

Con los datos antes presentados se ha podido establecer los siguientes rangos aproximados de reflectividad vs intensidad de lluvia (ver tabla 3.4.2).

Tabla 3.4.2: Rangos aproximados de reflectividad vs intensidad de lluvia.

<b>TIPO DE LLUVIA</b>	<b>RANGO DE REFLECTIVIDAD (dBz)</b>	<b>RANGO DE INTENSIDAD DE LLUVIA (mm/h)</b>
<b>Ruido - Llovizna</b>	<b>0 - 20</b>	<b>0 a 1</b>
<b>Lluvia Débil</b>	<b>20 - 40</b>	<b>1 a 12</b>
<b>Lluvia Moderada</b>	<b>40 - 48</b>	<b>12 a 40</b>
<b>Lluvia Fuerte</b>	<b>48 - 54</b>	<b>40 a 70</b>
<b>Lluvia Muy Fuerte o Extrema</b>	<b>55 - 64</b>	<b>&gt;70</b>

## 4 Conclusiones

- ✓ El sistema de radares LAWR de El Salvador ha demostrado ser una herramienta confiable y eficaz para detectar las lluvias en nuestro país, así como sus intensidades, distribuciones, localización y trayectorias, y de esta manera producir alertas tempranas para la población.
- ✓ Se utilizó de manera exitosa la ecuación de Marshall-Palmer para estimar la intensidad de lluvia y lluvia acumulada en las estaciones seleccionadas para los diferentes estudios de casos, utilizando los datos de reflectividad del radar de San Salvador.
- ✓ Se ha logrado establecer una buena correlación entre Reflectividad (dBz) e intensidad de lluvia (mm/h) para el radar de San Salvador en puntos o estaciones seleccionadas dentro de un radio de 20 Km a su alrededor. Con la curva experimental obtenida se calculó un Coeficiente de Correlación de 0.9207, esto quiere decir que la correlación para los datos analizados es buena y el margen de error es muy aceptable.
- ✓ Se observó que la mayor sensibilidad de detección del radar de San Salvador se encuentra en el rango desde los 20 dBz hasta 55 dBz, a pesar que la escala completa sea desde 0 dBz hasta 63.9 dBz. En cuanto a la intensidad de lluvia podemos observar que es posible estimar desde 0 a 100 mm/h. Es importante destacar ésto, debido a que la sensibilidad del radar y la intensidad de lluvia que puede medir se adaptan muy bien a las condiciones de lluvia locales, ya que las lluvias registradas en nuestro país presentan intensidades desde 0 a 60 mm/h principalmente y mayores a 60 mm/h de manera ocasional.
- ✓ Se calcularon constantes de ajuste para lograr una mejor estimación de intensidad de lluvia a partir de los datos de reflectividad del radar, ya que los datos obtenidos y procesados sin dichas constantes subestimaban en gran medida la intensidad de las lluvias; esto debido a bloqueos, atenuación o probablemente que la calibración inicial del proveedor de los radares no consideraba lluvias de fuerte intensidad, como las que ocurren en latitudes tropicales como las de nuestro país.
- ✓ Se observó buena correspondencia entre las tendencias de las curvas de lluvia acumulada medida por la mayoría de estaciones telemétricas analizadas y las curvas de las lluvias estimadas por reflectividad de radar utilizando las constantes de ajuste.
- ✓ Se pudo demostrar que la estimación de la lluvia por medio de radar, en estos casos, no sólo es buena en los valores de lluvia acumulada final sino también en los cambios de intensidad de la lluvia en intervalos cortos de tiempo.

- ✓ Se logró establecer una constante de ajuste promedio de **13.43** para el radar de San Salvador utilizando todas las constantes calculadas para los diferentes estudios de casos y diferentes estaciones telemétricas.
- ✓ Se elaboro e implementó un script informático para la extracción de los datos de radar y un diseño para la automatización de la extracción y utilización de estos datos.
- ✓ Con todos los datos procesados y analizados en este trabajo fue posible establecer rangos aproximados de intensidad de lluvia a partir de los datos de reflectividad provistos por el radar de San Salvador.
- ✓ Cabe mencionar que no siempre es posible obtener buenas correlaciones entre las estaciones y los datos estimados por radar, esto probablemente debido a que algunos sitios presentan mayor bloqueo en la trayectoria entre el radar y el sitio, o también debido a la distancia entre ellos, por lo que la atenuación de la señal no permite un potencia efectiva de radar en dichos lugares.

## 5 Recomendaciones

- ✓ Se recomienda al MARN replicar este trabajo para los demás radares LAWR de la red nacional con el fin de poder contar con sitios o estaciones virtuales donde sea posible hacer estimaciones de intensidad de lluvia a partir de los datos de reflectividad de los radares. Estos sitios pueden estar colocados en lugares de interés como por ejemplo: zonas desprovistas de estaciones telemétricas, cuencas de ríos de crecidas repentinas, zona susceptibles a inundaciones y deslizamientos, etc.
- ✓ Para futuras investigaciones de esta índole se deben seleccionar puntos o sitios en un radio de 20Km alrededor del radar en estudio, además obtener sus perfiles de elevación, con el propósito de escoger los sitios más adecuados y no tener problemas de bloqueo y atenuación de la señal.
- ✓ Se sugiere al MARN implementar la automatización de la extracción de los datos de reflectividad, así como su procesamiento y análisis para la obtención de la estimación de intensidad de lluvia de una manera más rápida y oportuna.
- ✓ Se recomienda al equipo informático del Ministerio modificar la constante del radar al archivo cfg.txt del radar de san salvador sumándole el valor **13.43** al dato de 82 con el cual se trabaja actualmente. Esto debido a la subestimación que presenta dicho radar en los valores calculados de intensidad de lluvia y lluvia acumulada
- ✓ Se recomienda que la información provista por los radares LAWR de El Salvador no se debe utilizar de manera aislada en el momento de desarrollar las tareas de monitoreo, vigilancia atmosférica y alertamiento temprano, siempre debe verificarse y apoyarse de otros recursos como son: imágenes de satélite, red de estaciones telemétricas, reportes METAR, reportes de observadores locales, modelos meteorológicos, etc.
- ✓ Se recomienda hacer la adquisición de una herramienta de software matemático que ofrezca un entorno de desarrollo mejor integrado con un lenguaje de programación propio para lograr hacer una mejor adquisición de datos y un análisis más rápido.

## 6 Referencia Bibliográfica

- [1] R. H. Sampieri, Carlos F. Collado, Pilar B. Lucio Metodología de la Investigación Mc. Graw Hill, Mexico (1991)
- [2] Lisbeth Pedersen, Scaling properties of precipitation, pag 17, Thesis (2003).
- [3] Ronald E. Rinehart Radar para meteorólogos, quinta edición, Rinehart Publications, pag 482,(2010).
- [4] Richard J. Doviak y Dusan S. Zrnic, *Doppler Radar and Weather Observations*, segunda edición., Dover Publications, 592 págs 2006,.
- [5] The COMET® Program, Fundamentos de radar meteorológico [http://www.meted.ucar.edu/radar/basic\\_wxradar\\_es/print.html](http://www.meted.ucar.edu/radar/basic_wxradar_es/print.html), págs. 4,11, 33(2012)
- [6] Schuur, T., Polarimetric Weather Radar FAQ, NATIONAL SEVERE STORMS LABORATORY, (online) <http://cimms.ou.edu/~schuur/radar.html#Q1> 17-10-2003. (2003)
- [7] Battan, L. J., Radar Observations of the Atmosphere, The University of Chicago Press, Chicago and London. (1973)
- [8] Quirnbach, M, Nutzung,Schriftenreihe, Hydrologie/Wasserwirtschaft, Ruhr-Univerisät Bochum. (2003),
- [9] Strahler, A. and A. Strahler, Introducing Physical Geography, John Wiley and Sons. (2002)
- [10]. Fenger, J. and J. C. Tjell Luftforurening; Polyteknisk Forlag, Lyngby. (1994),
- [11] MetService Terminology; New Zealand (online) <http://www.metservice.co.nz/forecasts/terminology.asp#common>. (2004),
- [12]. Zirkle, G., Official definitions of liquid precipitation, USATODAY (Online) <http://www.usatoday.com/weather/wrnrdriz.html> (2004)

- [13] C. Donald Ahrens, *Essentials of Meteorology*, sexta edición, USA (2010)
- [14] Ministerio de Educación de Panamá, *Manual: Sistemas de Alerta Temprana*, Panamá (2011)
- [15] L. S. Kumar *et al.*, *Progress in Electromagnetics Research B*, **32**, 107-127 (2011)
- [16] J. S. Marshall y W. M. Palmer, *Journal of Atmos. Sci.*, **5**, 165-166 (1948)
- [17] S. Fattorelli *et al.*, Comisión Europea, Dirección General XII para la Ciencia, la Investigación y el Desarrollo, Bélgica (1999)
- [18] L. J. Battan, Univ. of Chicago Press, **323** (1973)
- [19] Rafael P. G, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, **32**, 80-86 (2011)

## 7 Anexos

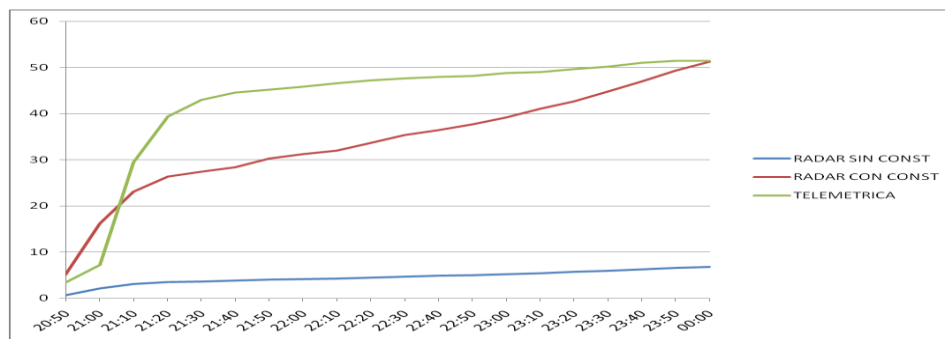
A continuación se han agregado las tablas y gráficas de las demás estaciones procesadas para cada estudio de caso que no se agregaron en el apartado de los resultados y discusión. Para el estudio de caso 6 no se agregó anexos debido a que las demás estaciones no presentaban registro de lluvias.

### 7.1 CASO 1: 18 DE JULIO DE 2013

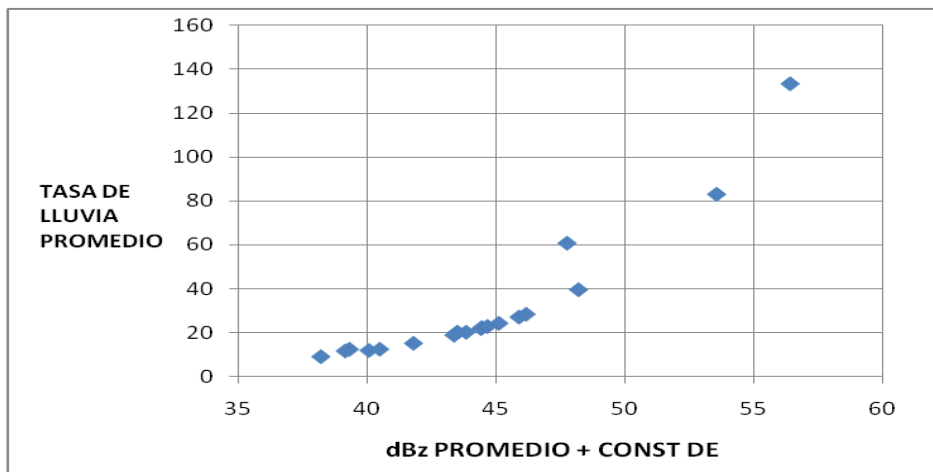
#### ILOPANGO

Tabla 7.1.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:50	0.67483565	5.060553464	3.4
21:00	2.157000847	16.17522445	7.2
21:10	3.079586967	23.09364433	29.4
21:20	3.51911726	26.38965655	39.4
21:30	3.657001195	27.42364019	43
21:40	3.786039992	28.39129466	44.6
21:50	4.033682849	30.2483541	45.2
22:00	4.165552801	31.23723924	45.8
22:10	4.2659059	31.98978132	46.6
22:20	4.489486119	33.66639644	47.2
22:30	4.713066338	35.34301155	47.6
22:40	4.851334006	36.37987279	48
22:50	5.019252762	37.63908581	48.2
23:00	5.228608562	39.20903283	48.8
23:10	5.471067865	41.02722111	49
23:20	5.695159498	42.70767129	49.6
23:30	5.96456993	44.72796452	50.2
23:40	6.265419173	46.98401557	51
23:50	6.580601973	49.34755314	51.4
00:00	6.833972585	51.24756468	51.4



Grafica 7.1.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

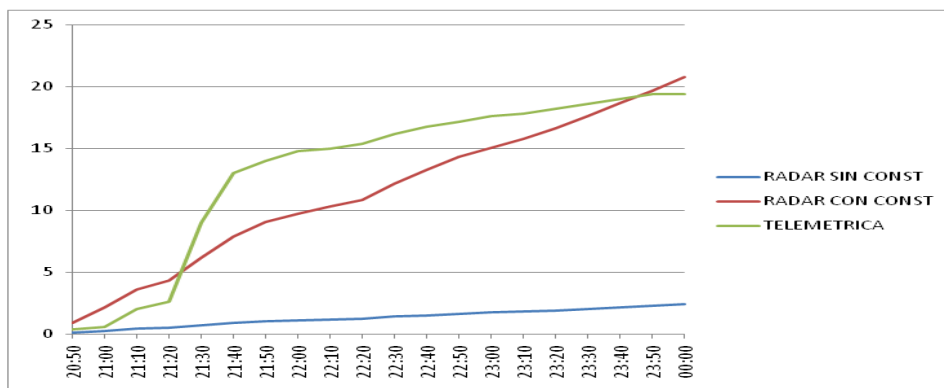


Grafica 7.1.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

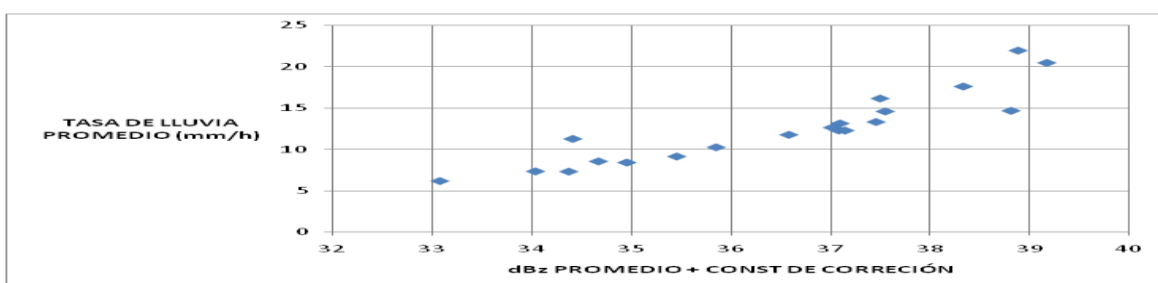
## BELLOSO

Tabla 7.1.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:50	0.108686672	0.941187804	0.4
21:00	0.250011854	2.165013459	0.6
21:10	0.419593151	3.633526988	2
21:20	0.502100694	4.348012878	2.6
21:30	0.713442183	6.178154772	9
21:40	0.910532912	7.884890171	13
21:50	1.051101751	9.10216617	14
22:00	1.121786619	9.714271903	14.8
22:10	1.192693748	10.32830235	15
22:20	1.252357639	10.84497035	15.4
22:30	1.408008587	12.19285203	16.2
22:40	1.534681467	13.28979398	16.8
22:50	1.653169212	14.31585558	17.2
23:00	1.741372156	15.07966161	17.6
23:10	1.82254861	15.78262074	17.8
23:20	1.921447105	16.63904642	18.2
23:30	2.034903816	17.62154106	18.6
23:40	2.156760182	18.67677371	19
23:50	2.275159082	19.70206595	19.4
00:00	2.403495922	20.8134172	19.4



Grafica7.1.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).

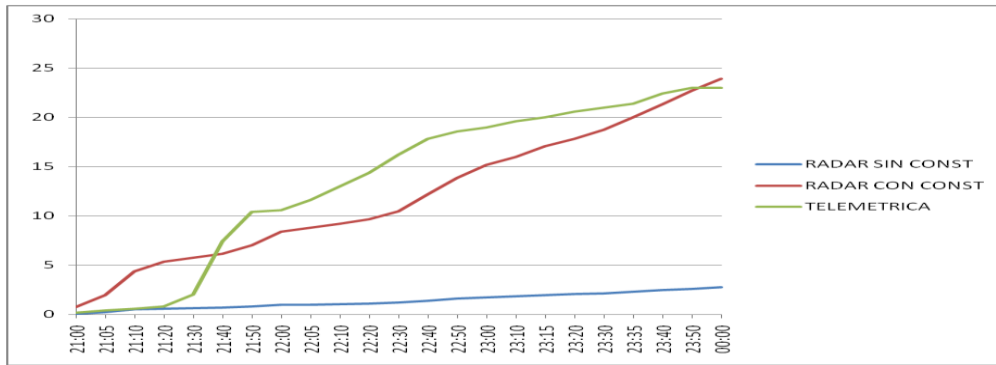


Grafica 7.1.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

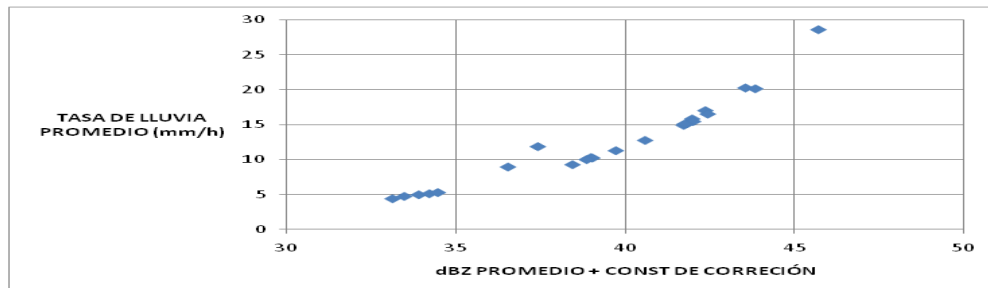
## BOQUERÓN

Tabla 7.1.3: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
21:00	0.085784058	0.742859337	0.2
21:05	0.22889707	1.982166962	0.4
21:10	0.503691792	4.361791217	0.6
21:20	0.617501906	5.347346202	0.8
21:30	0.662820165	5.739786155	2
21:40	0.710359939	6.15146364	7.4
21:50	0.809158819	7.007026691	10.4
22:00	0.972542769	8.421873411	10.6
22:05	1.014569417	8.78580919	11.6
22:10	1.063536554	9.209847126	13
22:20	1.114036679	9.64716019	14.4
22:30	1.212142554	10.49672207	16.2
22:40	1.406723224	12.18172125	17.8
22:50	1.600205889	13.8572121	18.6
23:00	1.752131748	15.17283584	19
23:10	1.848008743	16.00309641	19.6
23:15	1.970380464	17.06279185	20
23:20	2.059353392	17.83326567	20.6
23:30	2.167561113	18.77030592	21
23:35	2.312767268	20.02773942	21.4
23:40	2.461135561	21.31255591	22.4
23:50	2.619802127	22.68655176	23
00:00	<b>2.764832008</b>	<b>23.94245879</b>	<b>23</b>



Grafica 7.1.5: Curvas de lluvia acumulada (mm).

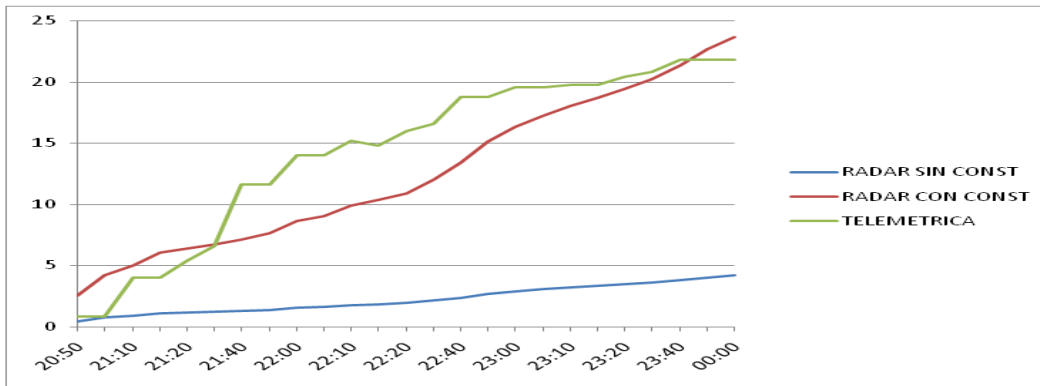


Grafica 7.1.6: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

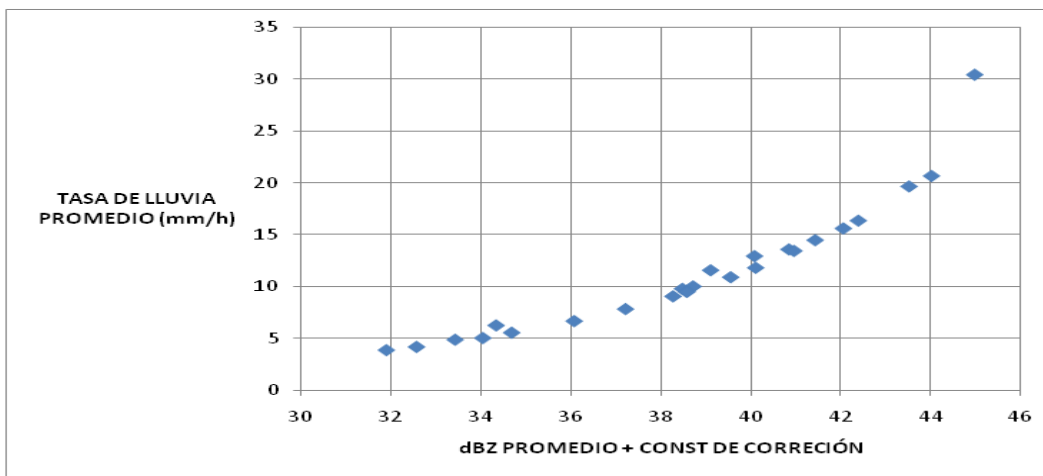
## PICACHO

Tabla 7.1.4: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:50	0.451590476	2.539479869	0.8
21:00	0.743205647	4.179352482	0.8
21:10	0.888233563	4.994904387	4
21:15	1.080075645	6.073711697	4
21:20	1.141825561	6.420956994	5.4
21:30	1.198970286	6.742305395	6.6
21:40	1.271135198	7.148118516	11.6
21:50	1.36377541	7.669072716	11.6
22:00	1.535286152	8.633548491	14
22:05	1.609827017	9.052722582	14
22:10	1.758254737	9.887392988	15.2
22:15	1.840403944	10.34935193	14.8
22:20	1.939160224	10.9046993	16
22:30	2.140609974	12.0375345	16.6
22:40	2.383233985	13.40190957	18.8
22:50	2.689807846	15.12590109	18.8
23:00	2.904499726	16.33320225	19.6
23:05	3.066058608	17.2417146	19.6
23:10	3.207767437	18.03860191	19.8
23:15	3.323864388	18.69146305	19.8
23:20	3.458107986	19.44637027	20.4
23:30	3.598626045	20.23656139	20.8
23:40	3.797913913	21.35723943	21.8
23:50	4.029439904	22.65920575	21.8
00:00	<b>4.204518221</b>	<b>23.64374348</b>	<b>21.8</b>



Grafica 7.1.7: Curvas de lluvia acumulada (mm).

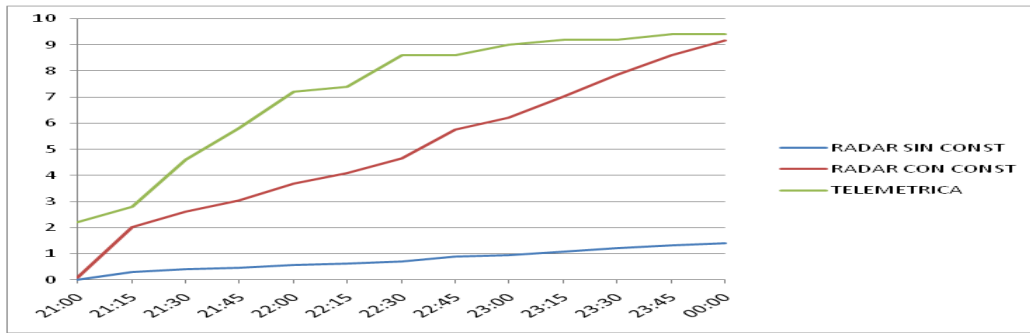


Grafica 7.1.8: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

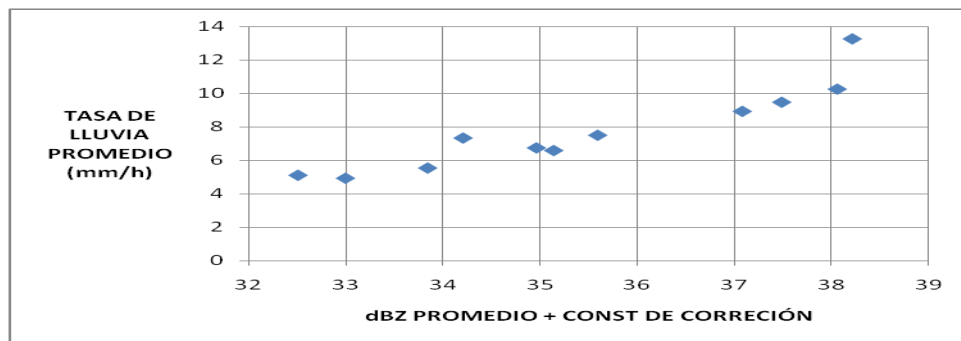
## LA CIMA

Tabla 7.1.5: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
21:00	0.014956077	0.097122018	2.2
21:15	0.309885269	2.012338015	2.8
21:30	0.40403797	2.623748364	4.6
21:45	0.469724642	3.050305547	5.8
22:00	0.566037276	3.675742099	7.2
22:15	0.629452587	4.08754948	7.4
22:30	0.716061975	4.649974936	8.6
22:45	0.886119276	5.754295811	8.6
23:00	0.957321797	6.216671904	9
23:15	1.078891882	7.006125707	9.2
23:30	1.210506144	7.86080455	9.2
23:45	1.32507719	8.604807876	9.4
00:00	1.409676453	9.154179951	9.4



Grafica 7.1.9: Curvas de lluvia acumulada (mm).

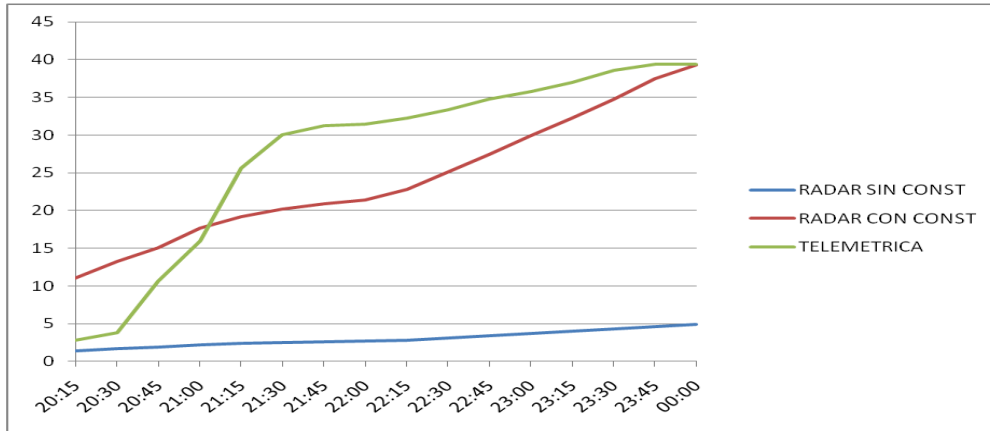


Grafica 7.1.10: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

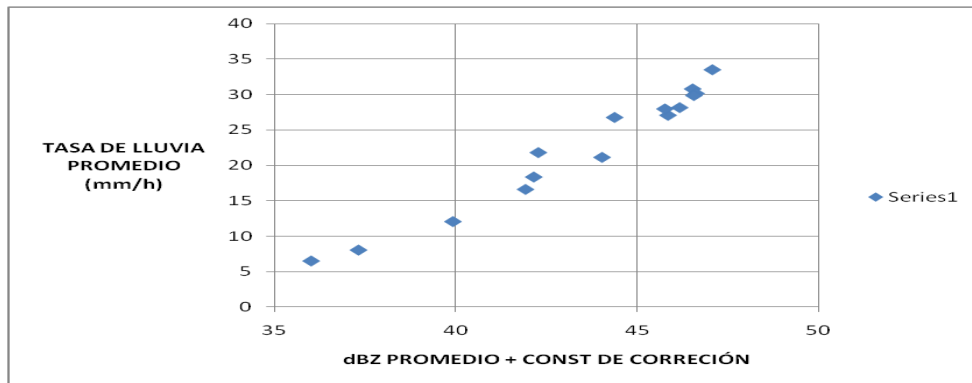
## TONACATEPEQUE

Tabla 7.1.6: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:15	1.369341281	11.03472974	2.8
20:30	1.646238343	13.26608308	3.8
20:45	1.871919907	15.08472033	10.6
21:00	2.190365373	17.65088825	16
21:15	2.380406805	19.18232227	25.6
21:30	2.505479319	20.19020936	30
21:45	2.588956566	20.86290423	31.2
22:00	2.656559657	21.40767846	31.4
22:15	2.828517276	22.7933855	32.2
22:30	3.119759297	25.14033657	33.4
22:45	3.3997745	27.39681721	34.8
23:00	3.71158233	29.90949625	35.8
23:15	4.000865551	32.24066249	37
23:30	4.30971924	34.72953581	38.6
23:45	4.656139243	37.52113434	39.4
00:00	4.874840301	39.28351973	39.4



Grafica 7.1.11: Curvas de lluvia acumulada (mm).

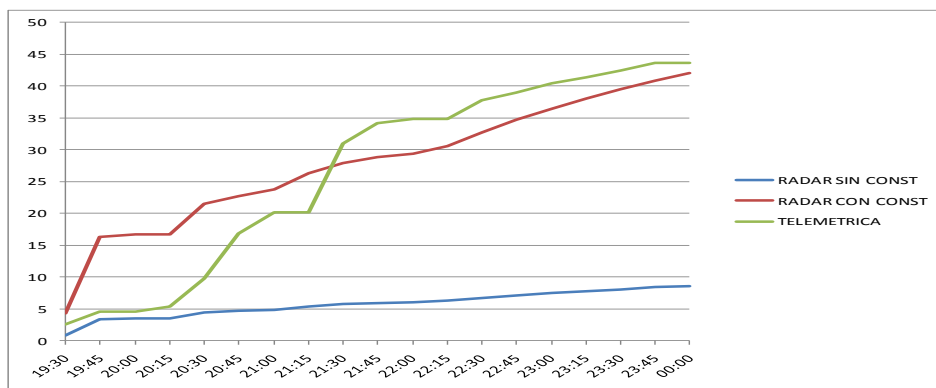


Grafica 7.1.12: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

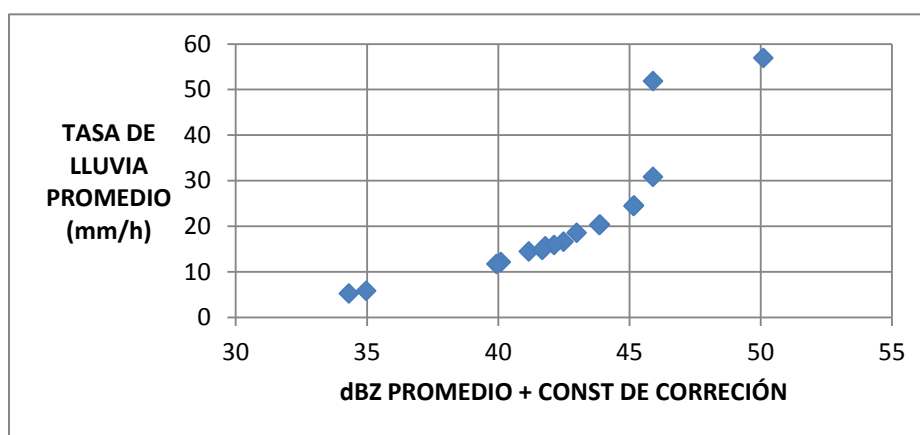
## APOPA

Tabla 7.1.7: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:30	0.887510745	4.321889111	2.6
19:45	3.353492988	16.33042181	4.6
20:00	3.443330269	16.7679002	4.6
20:15	3.443330269	16.7679002	5.4
20:30	4.417739841	21.51295837	9.8
20:45	4.665381548	22.71889306	16.8
21:00	4.873413074	23.73193904	20.2
21:15	5.401144464	26.30181953	20.2
21:30	5.718878758	27.84908236	31
21:45	5.919561944	28.8263443	34.2
22:00	6.019473323	29.31288027	34.8
22:15	6.28654235	30.6134197	34.8
22:30	6.707061186	32.66120987	37.8
22:45	7.125421675	34.69848959	39
23:00	7.474225737	36.3970521	40.4
23:15	7.821350854	38.08743869	41.4
23:30	8.105549152	39.4713921	42.4
23:45	8.377478451	40.79559949	43.6
00:00	8.630771029	42.02905208	43.6



Grafica 7.1.13: Curvas de lluvia acumulada (mm).



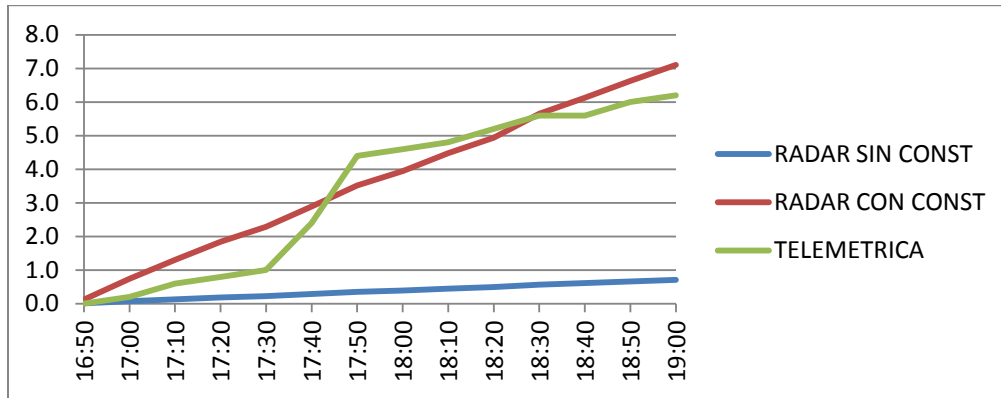
Grafica 7.1.14: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.2 CASO 2: 29 DE JULIO DE 2013

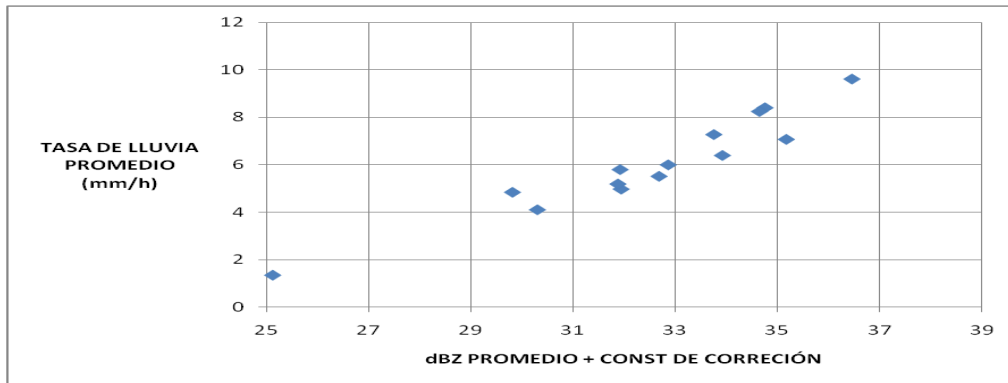
### BELLOSO

Tabla 7.2.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
16:50	0.0	0.1	0.0
17:00	0.1	0.7	0.2
17:10	0.1	1.3	0.6
17:20	0.2	1.8	0.8
17:30	0.2	2.3	1.0
17:40	0.3	2.9	2.4
17:50	0.4	3.5	4.4
18:00	0.4	3.9	4.6
18:10	0.4	4.5	4.8
18:20	0.5	4.9	5.2
18:30	0.6	5.6	5.6
18:40	0.6	6.1	5.6
18:50	0.7	6.6	6.0
19:00	0.7	7.1	6.2



Grafica 7.2.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

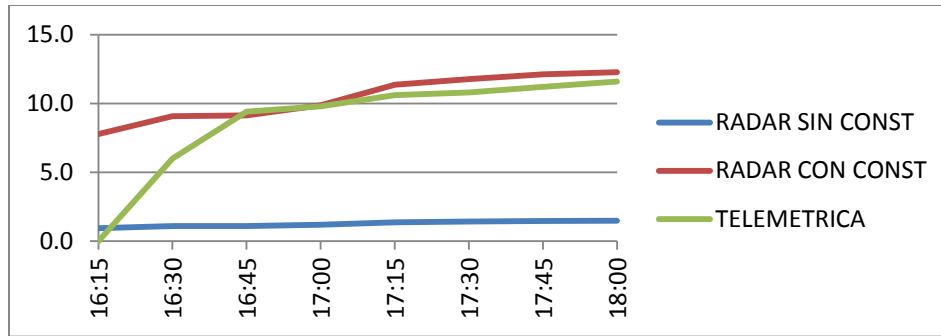


Grafica 7.2.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

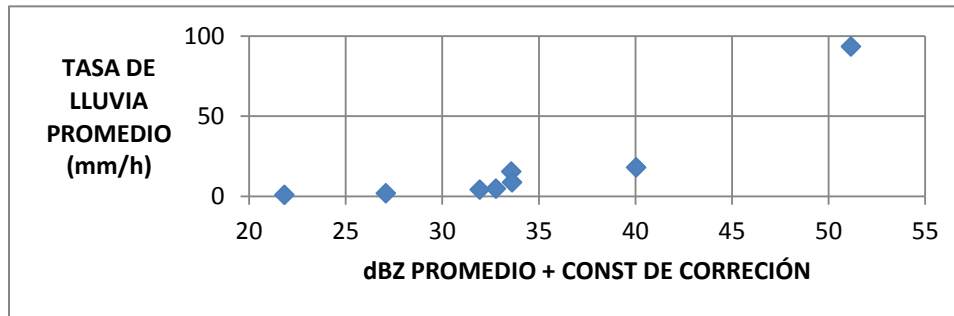
## LA CIMA

Tabla 7.2.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
16:15	0.9	7.8	0.0
16:30	1.1	9.1	6.0
16:45	1.1	9.1	9.4
17:00	1.2	9.9	9.8
17:15	1.4	11.4	10.6
17:30	1.4	11.8	10.8
17:45	1.5	12.1	11.2
18:00	1.5	12.3	11.6



Grafica 7.2.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).



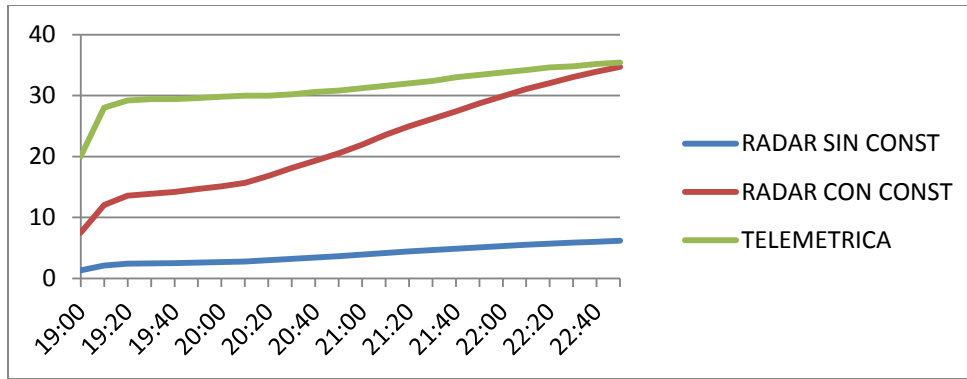
Grafica 7.2.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

### 7.3 CASO 3: 11 DE AGOSTO DE 2013

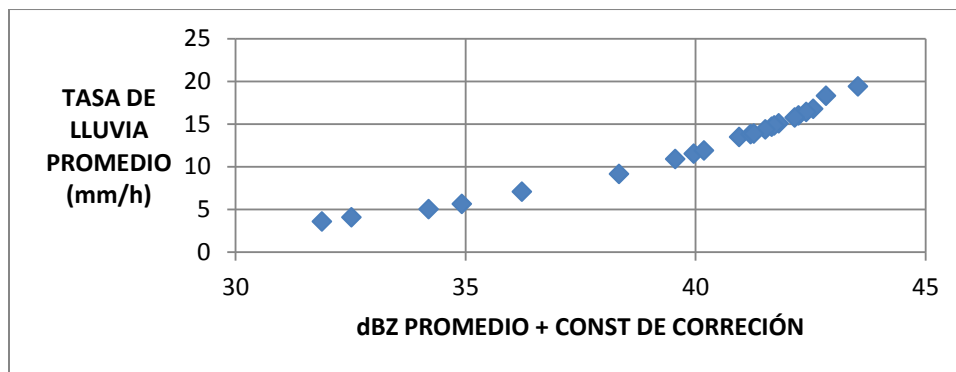
#### ILOPANGO

Tabla 7.3.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:00	1.33430212	7.50333223	20
19:10	2.14016332	12.0350228	28
19:20	2.41161867	13.5615284	29.2
19:30	2.4722572	13.9025239	29.4
19:40	2.52562661	14.2026422	29.4
19:50	2.60945219	14.674028	29.6
20:00	2.68420939	15.0944186	29.8
20:10	2.78928652	15.6853108	30
20:20	2.98922005	16.8096196	30
20:30	3.22656228	18.1442931	30.2
20:40	3.4313799	19.2960672	30.6
20:50	3.65499977	20.5535742	30.8
21:00	3.90380303	21.9526977	31.2
21:10	4.19146951	23.5703652	31.6
21:20	4.43483248	24.9388957	32
21:30	4.65257556	26.1633551	32.4
21:40	4.8725803	27.4005326	33
21:50	5.1063373	28.7150448	33.4
22:00	5.31943863	29.9134017	33.8
22:10	5.52524901	31.0707585	34.2
22:20	5.69620512	32.0321154	34.6
22:30	5.87271414	33.0246985	34.8
22:40	6.03442827	33.9340839	35.2
22:50	6.17023409	34.6977762	35.4



Grafica 7.3.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

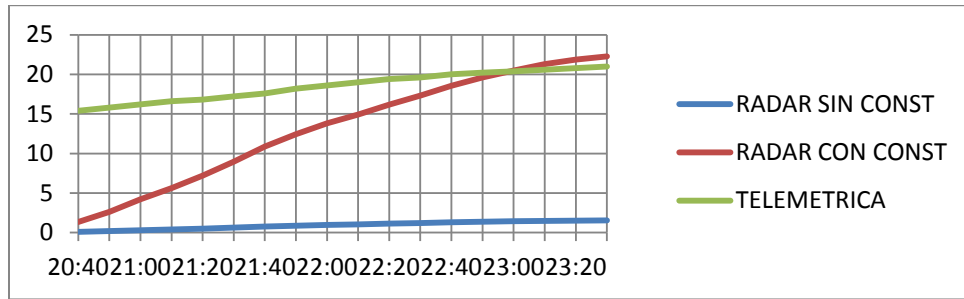


Grafica 7.3.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

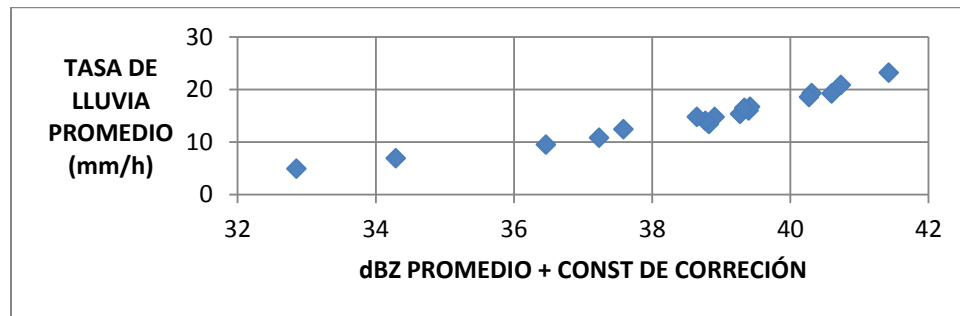
## BELLOSO

Tabla 7.3.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:40	0.093052791	1.333458193	15.4
20:50	0.182312823	2.612565668	15.8
21:00	0.294127786	4.214888148	16.2
21:10	0.391297398	5.607340901	16.6
21:20	0.50356415	7.216137563	16.8
21:30	0.624834974	8.953963723	17.2
21:40	0.759692688	10.88649172	17.6
21:50	0.867596105	12.43276125	18.2
22:00	0.963554475	13.80785675	18.6
22:10	1.041651348	14.92699476	19
22:20	1.127521754	16.15752846	19.4
22:30	1.209130074	17.32698595	19.6
22:40	1.295126585	18.55932676	20
22:50	1.367464533	19.59593865	20.2
23:00	1.430413717	20.49800837	20.4
23:10	1.485722241	21.29058647	20.6
23:20	1.525993791	21.86768284	20.8
23:30	1.554714964	22.27926086	21



Grafica 7.3.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).

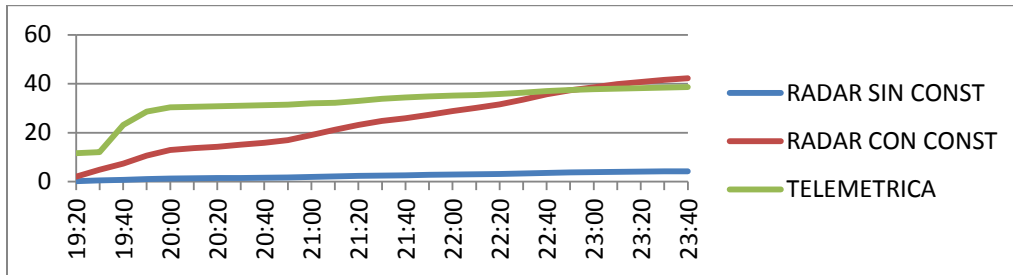


Grafica 7.3.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

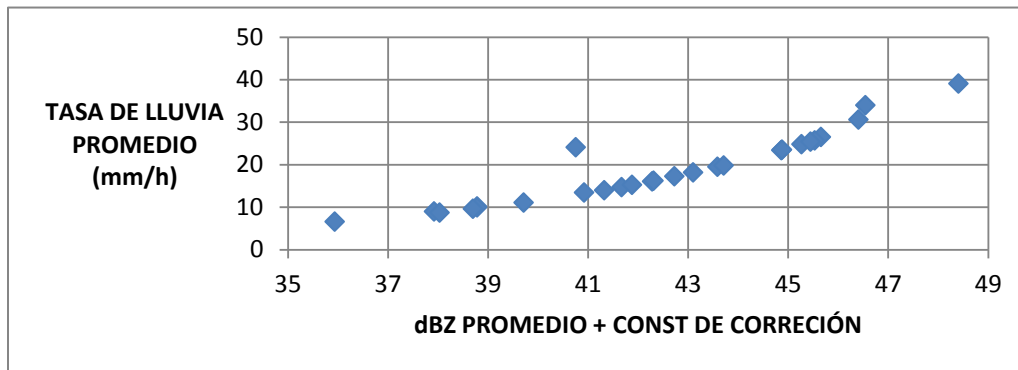
## PROCAFE

Tabla 7.3.3: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:20	0.200950363	2.009503625	11.6
19:30	0.484322033	4.843220326	12
19:40	0.739561443	7.395614431	23.2
19:50	1.065364957	10.65364957	28.6
20:00	1.286520761	12.86520761	30.4
20:10	1.371471307	13.71471307	30.6
20:20	1.426705195	14.26705195	30.8
20:30	1.509872924	15.09872924	31
20:40	1.585034113	15.85034113	31.2
20:50	1.697335051	16.97335051	31.4
21:00	1.904323686	19.04323686	32
21:10	2.118695135	21.18695135	32.2
21:20	2.313949978	23.13949978	33
21:30	2.4767196	24.767196	33.8
21:40	2.593433056	25.93433056	34.4
21:50	2.727527796	27.27527796	34.8
22:00	2.879226474	28.79226474	35.2
22:10	3.014641764	30.14641764	35.4
22:20	3.158748192	31.58748192	35.8
22:30	3.354992625	33.54992625	36.4
22:40	3.56698196	35.6698196	37
22:50	3.732221829	37.32221829	37.4
23:00	3.855060707	38.55060707	37.8
23:10	3.982383903	39.82383903	38
23:20	4.07495573	40.7495573	38.2
23:30	4.155409906	41.55409906	38.4
23:40	4.228336223	42.28336223	38.6



Grafica 7.3.5: Curvas de lluvia acumulada (mm).

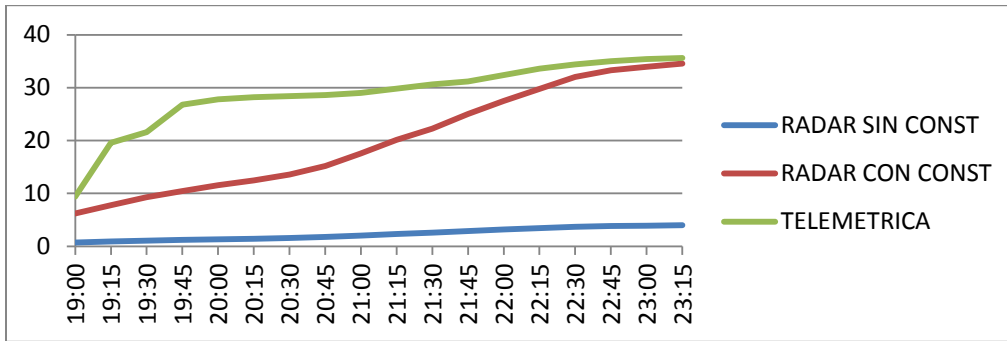


Grafica 7.3.6: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

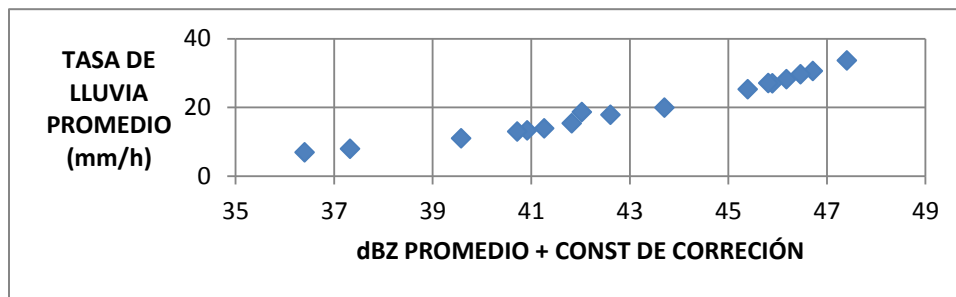
## TONACATEPEQUE

Tabla 7.3.4: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:00	0.720219709	6.236845728	9.4
19:15	0.899955779	7.79329597	19.6
19:30	1.071955305	9.282750507	21.6
19:45	1.205909592	10.44274684	26.8
20:00	1.334172358	11.55345663	27.8
20:15	1.440238571	12.47195219	28.2
20:30	1.565293153	13.55488026	28.4
20:45	1.757302617	15.21761372	28.6
21:00	2.029096344	17.57125042	29
21:15	2.323837214	20.12360121	29.8
21:30	2.567416639	22.23291213	30.6
21:45	2.891642947	25.04059628	31.2
22:00	3.177273677	27.5140565	32.4
22:15	3.437443778	29.76703676	33.6
22:30	3.698359507	32.02647388	34.4
22:45	3.846508629	33.30939243	35
23:00	3.923197229	33.97348834	35.4
23:15	3.989986296	34.55185783	35.6



Grafica 7.3.7: Curvas de lluvia acumulada (mm).

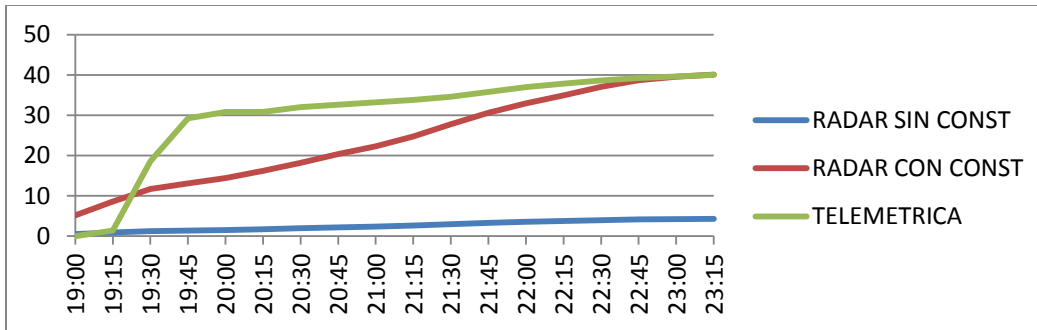


Grafica 7.3.8: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

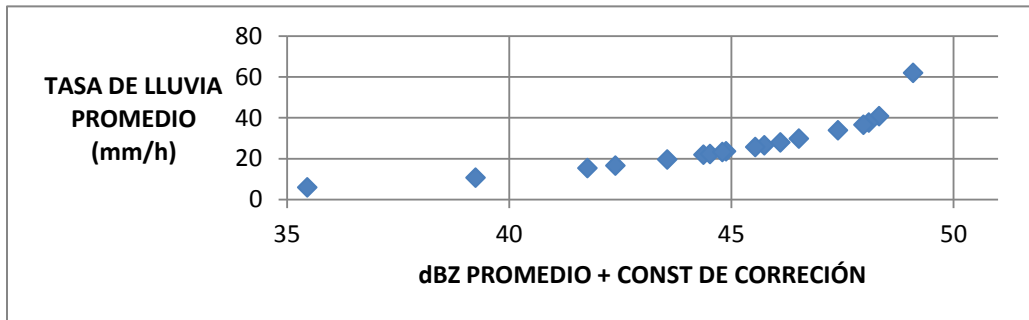
## APOPA

Tabla 7.3.5: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:00	0.555048387	5.165125103	0
19:15	0.920528301	8.566179	1.4
19:30	1.258041953	11.70698668	18.6
19:45	1.407222671	13.09522073	29.2
20:00	1.545568141	14.38262499	30.8
20:15	1.742400972	16.21429629	30.8
20:30	1.954177271	18.18502732	32
20:45	2.192250391	20.4004692	32.6
21:00	2.392166084	22.26082875	33.2
21:15	2.659481098	24.74838753	33.8
21:30	2.987311463	27.79908525	34.6
21:45	3.291081257	30.62588203	35.8
22:00	3.541751179	32.95854624	37
22:15	3.75038852	34.90006699	37.8
22:30	3.980884938	37.04500222	38.6
22:45	4.156766973	38.68171126	39.2
23:00	4.253198286	39.5790741	39.6
23:15	4.307160998	40.081236	40



Grafica 7.3.9: Curvas de lluvia acumulada (mm).



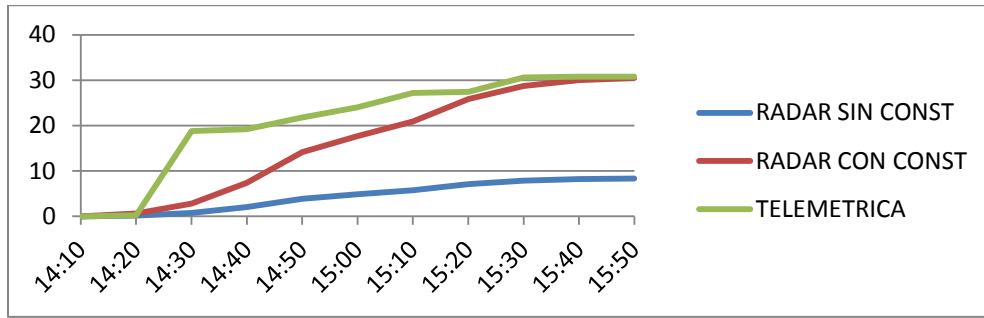
Grafica 7.3.10: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.4 CASO 4: 15 DE AGOSTO DE 2013

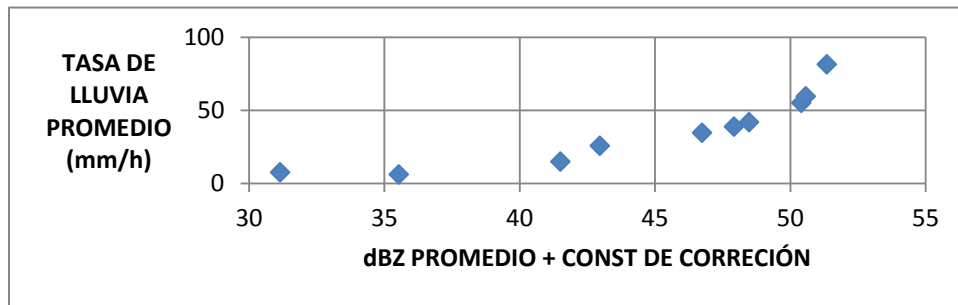
### PROCAFE

Tabla 7.4.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
14:10	0	0	0
14:20	0.173758858	0.634522394	0.2
14:30	0.761894254	2.782240691	18.8
14:40	2.019319718	7.374033158	19.2
14:50	3.877580365	14.15992026	21.8
15:00	4.833518528	17.6507591	24
15:10	5.719743414	20.88702309	27.2
15:20	7.078859264	25.85016254	27.4
15:30	7.870001869	28.73921064	30.6
15:40	8.211083916	29.98475403	30.8
15:50	8.351738508	30.49838821	30.8



Grafica 7.4.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

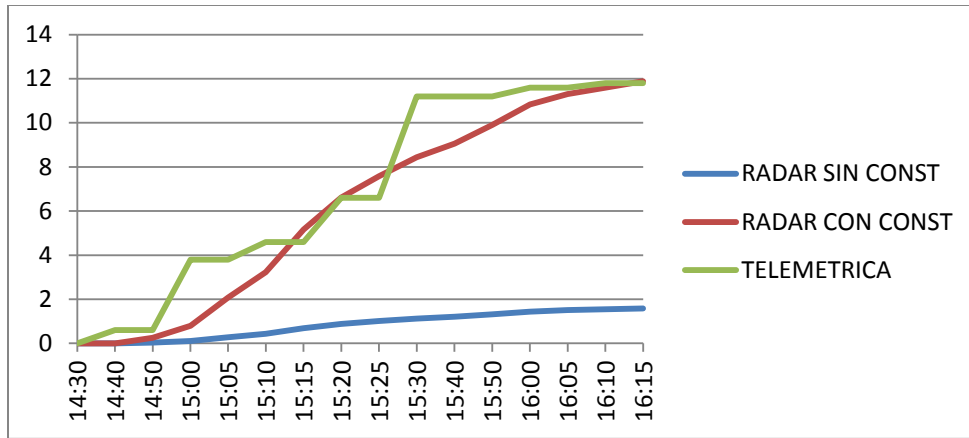


Grafica 7.4.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

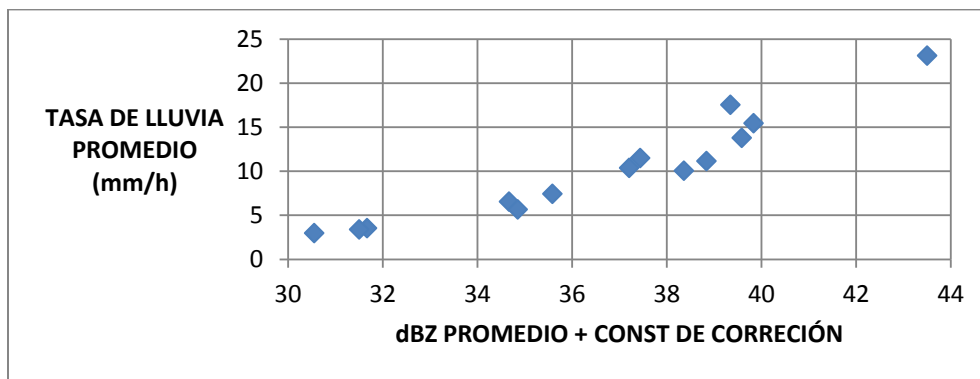
## PICACHO

Tabla 7.4.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
14:30	0	0	0
14:40	0	0	0.6
14:50	0.033102321	0.248232388	0.6
15:00	0.105891225	0.794072168	3.8
15:05	0.277569031	2.081474094	3.8
15:10	0.430781632	3.230406514	4.6
15:15	0.687717626	5.157154651	4.6
15:20	0.882642646	6.618886088	6.6
15:25	1.010388896	7.57684782	6.6
15:30	1.12573323	8.441808308	11.2
15:40	1.208348578	9.061336019	11.2
15:50	1.320124565	9.899537666	11.2
16:00	1.444057939	10.82890687	11.6
16:05	1.506998368	11.3008935	11.6
16:10	1.546368227	11.59612579	11.8
16:15	1.58407549	11.87889037	11.8



Grafica 7.4.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).

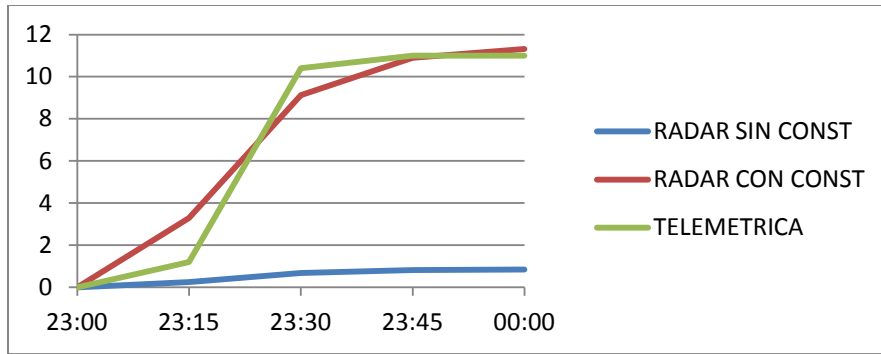


Grafica 7.4.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

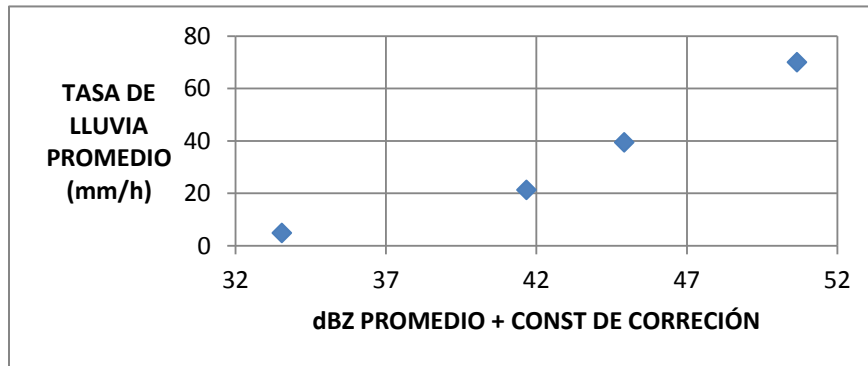
## LA CIMA

Tabla 7.4.3: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
23:00	0	0	0
23:15	0.246639784	3.288994375	1.2
23:30	0.684296579	9.125241537	10.4
23:45	0.817588514	10.90271807	11
00:00	0.84829769	11.3122315	11



Grafica 7.4.5: Curvas de lluvia acumulada (mm).

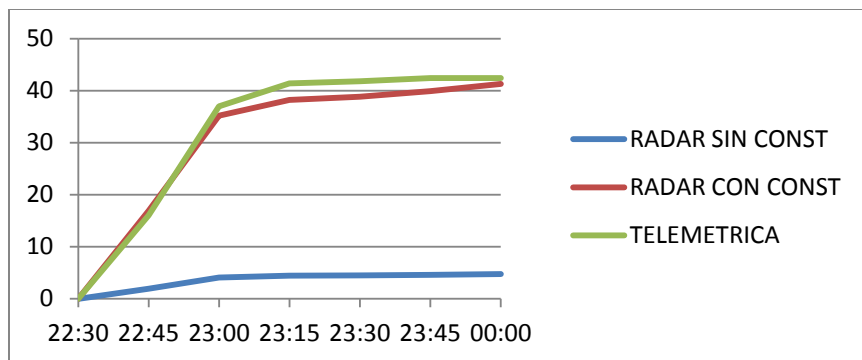


Grafica 7.4.6: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

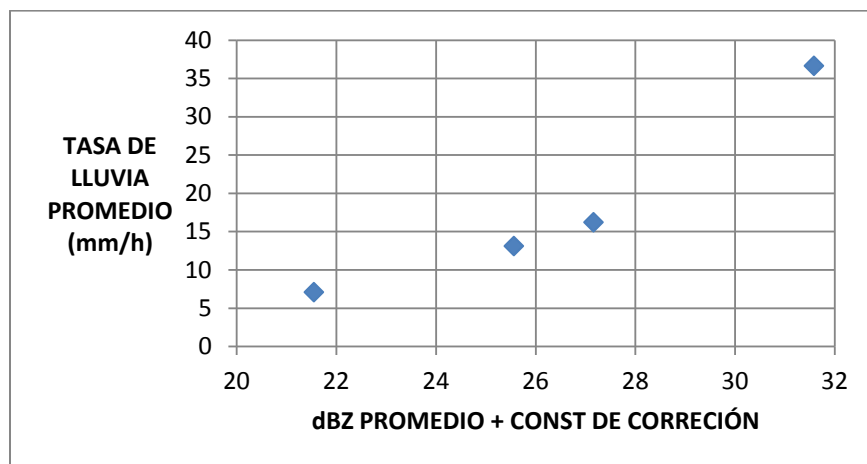
## TONACATEPEQUE

Tabla 7.4.4: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
22:30	0	0	0
22:45	1.95019809	16.88801966	16
23:00	4.06181188	35.17384176	37
23:15	4.41455785	38.22849598	41.4
23:30	4.48289259	38.82025045	41.8
23:45	4.60915657	39.91365146	42.4
00:00	4.76531684	41.2659437	42.4



Grafica 7.4.7: Curvas de lluvia acumulada (mm).

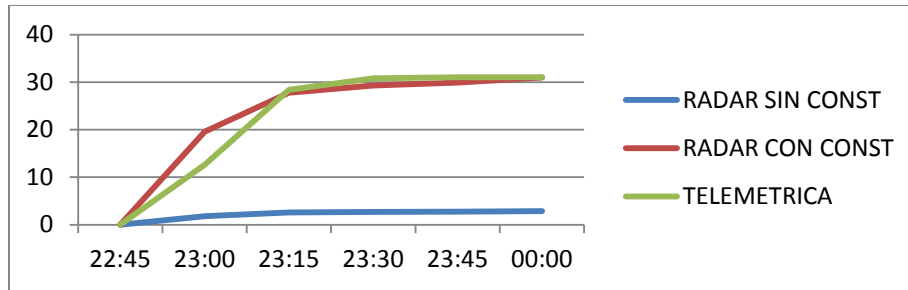


Grafica 7.4.8: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

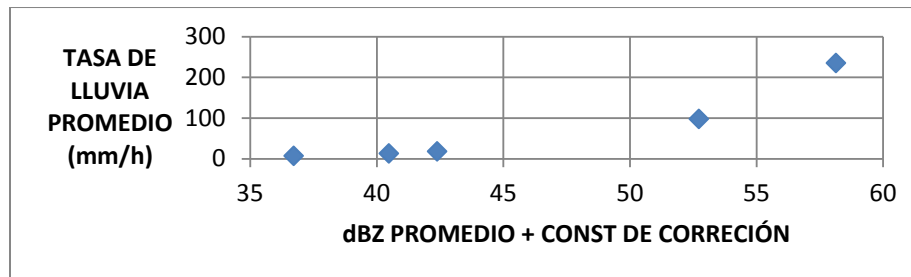
## APOPA

Tabla 7.4.5: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
22:45	0	0	0
23:00	1.824534767	19.60659344	12.6
23:15	2.583824573	27.76598113	28.4
23:30	2.725129047	29.28445007	30.8
23:45	2.781171002	29.88668131	31
00:00	2.883637504	30.98779436	31



Grafica 7.4.9: Curvas de lluvia acumulada (mm).



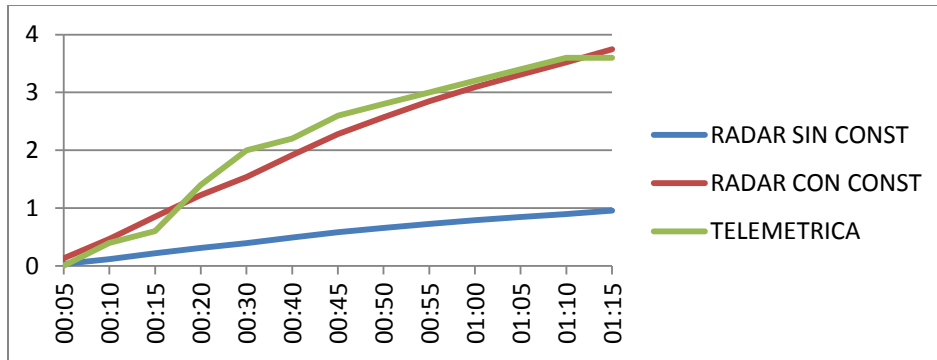
Grafica 7.4.10: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.5 CASO 5: 19 DE AGOSTO DE 2013

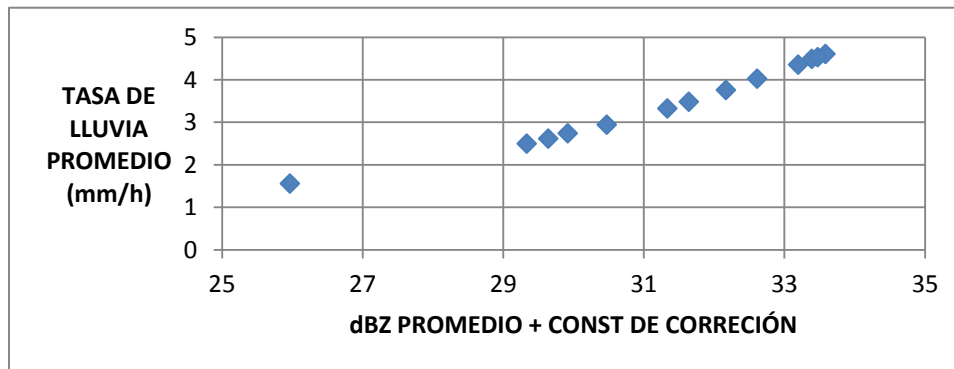
### BOQUERÓN

Tabla 7.5.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
00:05	0.03315693	0.130114076	0
00:10	0.11868059	0.465725174	0.4
00:15	0.21654917	0.849780016	0.6
00:20	0.31198544	1.224290054	1.4
00:30	0.39185461	1.53771186	2
00:40	0.48811239	1.915445651	2.2
00:45	0.58065796	2.27861203	2.6
00:50	0.65464973	2.568969749	2.8
00:55	0.72529806	2.846207202	3
01:00	0.78784445	3.091651122	3.2
01:05	0.84343083	3.309782639	3.4
01:10	0.89652971	3.518152723	3.6
01:15	0.95478564	3.746760036	3.6



Grafica 7.5.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

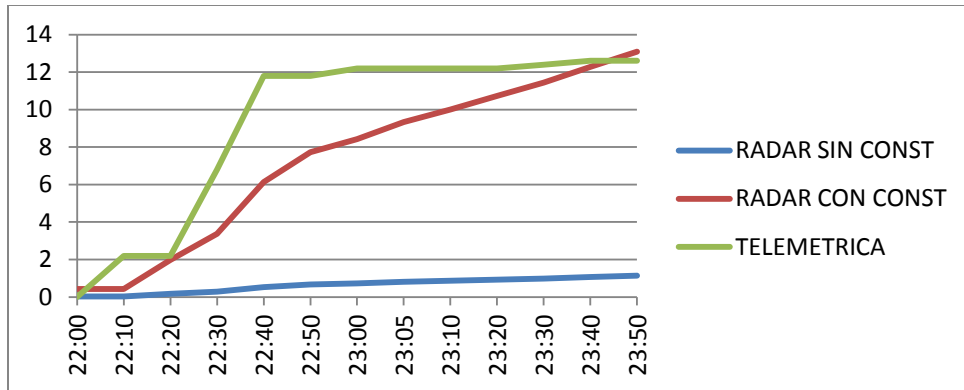


Grafica 7.5.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

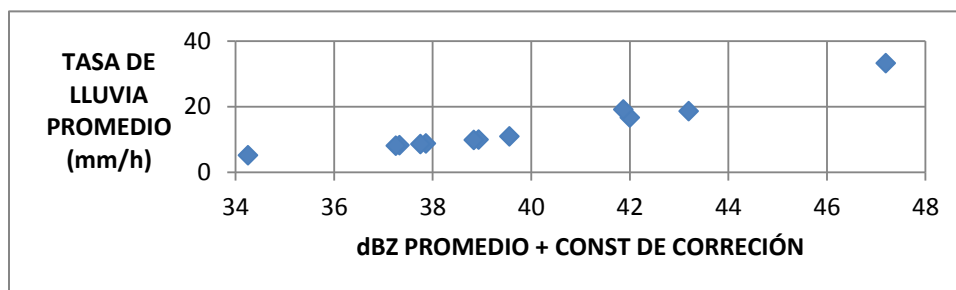
## PICACHO

Tabla 7.5.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
22:00	0.037225554	0.429873986	0
22:10	0.037225554	0.429873986	2.2
22:20	0.171502388	1.980478685	2.2
22:30	0.291689224	3.368374612	6.8
22:40	0.531570331	6.138478418	11.8
22:50	0.669503594	7.731306893	11.8
23:00	0.728954249	8.417832338	12.2
23:05	0.807742267	9.327662182	12.2
23:10	0.866013516	10.00056806	12.2
23:20	0.929239564	10.73069108	12.2
23:30	0.991152432	11.44564972	12.4
23:40	1.062916625	12.27436969	12.6
23:50	1.133868857	13.09371329	12.6



Grafica 7.5.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).

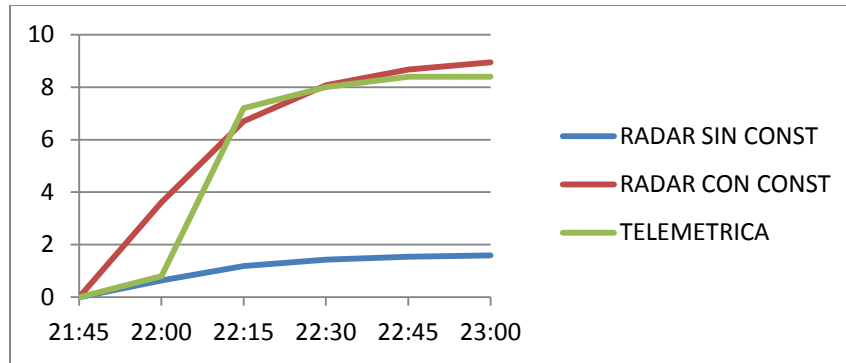


Grafica 7.5.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

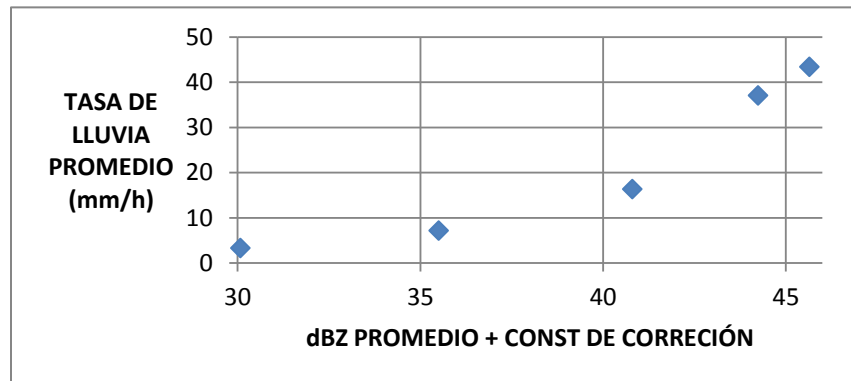
## LA CIMA

Tabla 7.5.3: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
21:45	0	0	0
22:00	0.643102401	3.616430566	0.8
22:15	1.192446474	6.705619305	7.2
22:30	1.434855526	8.068785578	8
22:45	1.54117892	8.666685965	8.4
23:00	1.590408881	8.94352638	8.4



Grafica 7.5.5: Curvas de lluvia acumulada (mm).



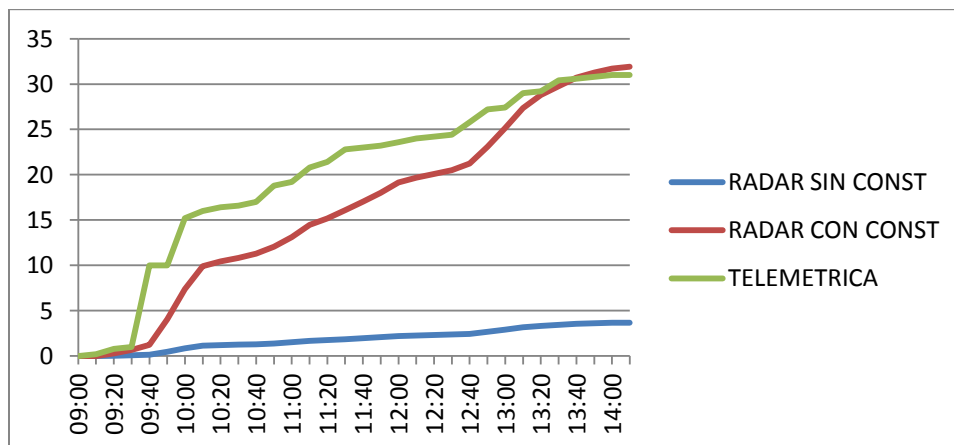
Grafica 7.5.6: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.6 CASO 7: 11 DE SEPTIEMBRE DE 2013

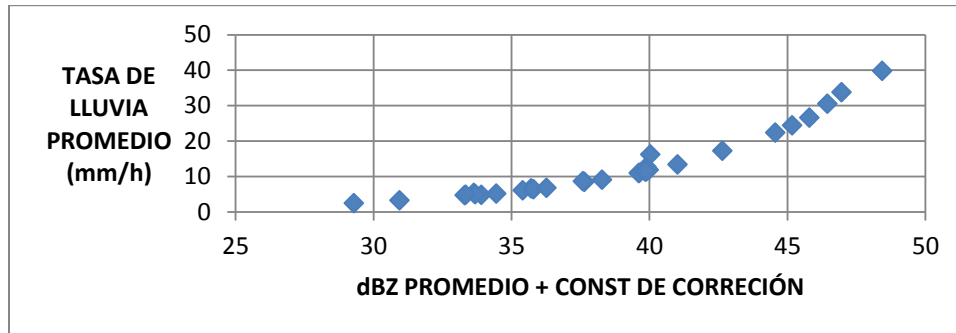
### PROCAFE

Tabla 7.6.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
09:00	0	0	0
09:10	0	0	0.2
09:20	0.032016778	0.277253876	0.8
09:30	0.078017739	0.675605783	1
09:40	0.142388962	1.233037607	10
09:50	0.467837712	4.051307675	10
10:00	0.851128492	7.370469084	15.2
10:10	1.145301705	9.917904163	16
10:20	1.204379676	10.42949831	16.4
10:30	1.25127724	10.83561448	16.6
10:40	1.303475299	11.28763106	17
10:50	1.391434963	12.04933037	18.8
11:00	1.514237289	13.11275469	19.2
11:10	1.670775347	14.46831842	20.8
11:20	1.752959096	15.18000037	21.4
11:30	1.85877202	16.09630254	22.8
11:40	1.965361481	17.01932925	23
11:50	2.080036117	18.01237068	23.2
12:00	2.209476589	19.13327899	23.6
12:10	2.271600659	19.67125128	24
12:20	2.320236389	20.09241934	24.2
12:30	2.367359572	20.5004893	24.4
12:40	2.451219561	21.22668689	25.8
12:50	2.667048378	23.09568744	27.2
13:00	2.902604788	25.13552191	27.4
13:10	3.159012139	27.3559181	29
13:20	3.32551643	28.79778585	29.2
13:30	3.436188469	29.75616623	30.4
13:40	3.545972387	30.70685578	30.6
13:50	3.611855559	31.27738055	30.8
14:00	3.662193452	31.71328875	31
14:10	3.686545918	31.92417241	31



Grafica 7.6.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

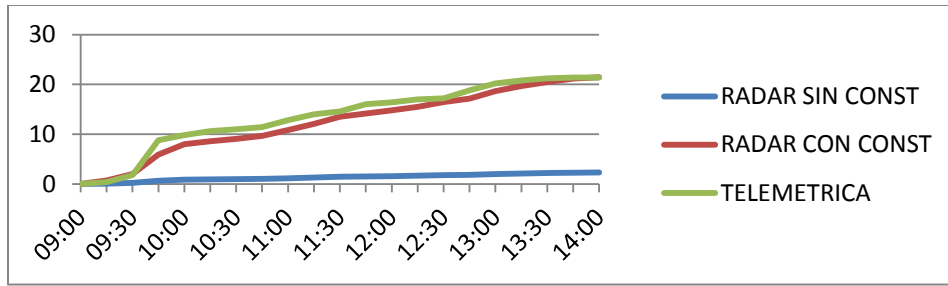


Grafica 7.6.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

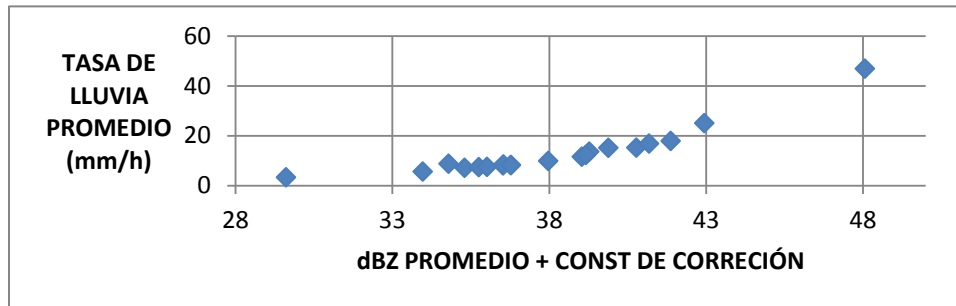
## LA CIMA

Tabla 7.6.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
09:00	0	0	0
09:15	0.078630095	0.731709679	0.4
09:30	0.214459416	1.995699366	1.8
09:45	0.634568132	5.905113616	8.8
10:00	0.859000799	7.993621269	9.8
10:15	0.922942849	8.588648107	10.6
10:30	0.973367575	9.057886505	11
10:45	1.039714752	9.675294789	11.4
11:00	1.161786366	10.81125909	12.8
11:15	1.298128286	12.08001888	14
11:30	1.449172985	13.48559862	14.6
11:45	1.521763138	14.16110229	16
12:00	1.589059716	14.78734543	16.4
12:15	1.665104024	15.4949925	17
12:30	1.768939541	16.46125679	17.2
12:45	1.842733073	17.14795877	18.8
13:00	2.003133115	18.64059671	20.2
13:15	2.113402636	19.66673405	20.8
13:30	2.202022354	20.49140437	21.2
13:45	2.275815886	21.17810634	21.4
14:00	<b>2.305731101</b>	<b>21.45648897</b>	<b>21.4</b>



Grafica 7.6.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).

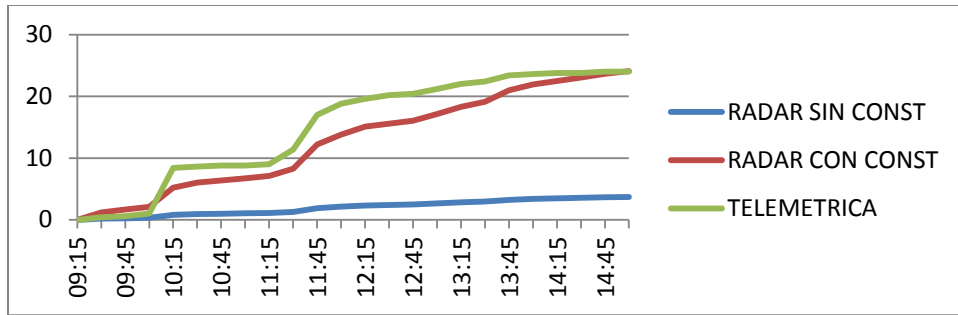


Grafica 7.6.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

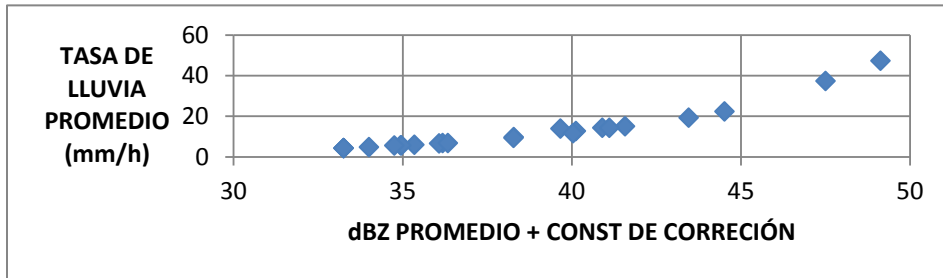
## TONACATEPEQUE

Tabla 7.6.3: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
09:15	0	0	0
09:30	0.18436979	1.197263564	0.4
09:45	0.25777284	1.67392949	0.6
10:00	0.32017147	2.079134687	1
10:15	0.79974207	5.19337808	8.4
10:30	0.92538879	6.009304814	8.6
10:45	0.98140323	6.373052305	8.8
11:00	1.03741767	6.736799796	8.8
11:15	1.09343211	7.100547288	9
11:30	1.27252739	8.263559136	11.4
11:45	1.87986727	12.20751272	17
12:00	2.12797001	13.81864635	18.8
12:15	2.32178603	15.07725201	19.6
12:30	2.39893718	15.57825742	20.2
12:45	2.47220557	16.05404885	20.4
13:00	2.63601401	17.11779076	21.2
13:15	2.81998887	18.31248971	22
13:30	2.94043079	19.09461746	22.4
13:45	3.22780486	20.96077188	23.4
14:00	3.37782106	21.93494953	23.6
14:15	3.46570075	22.50562409	23.8
14:30	3.5512859	23.06139833	23.8
14:45	3.63925291	23.6326399	24
15:00	3.7117093	24.10315844	24



Grafica 7.6.5: Curvas de lluvia acumulada (mm).

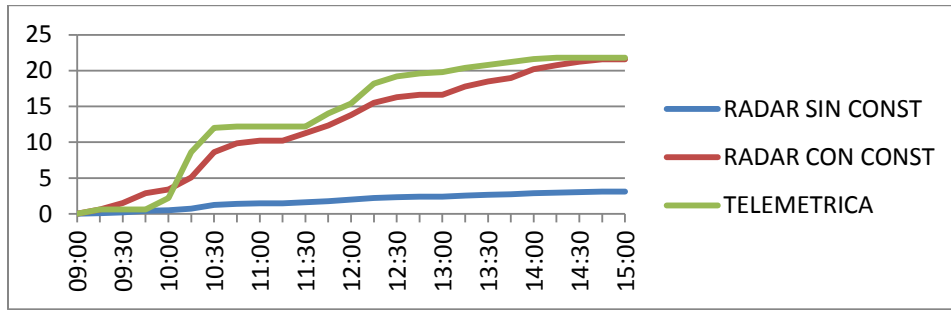


Grafica 7.6.6: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

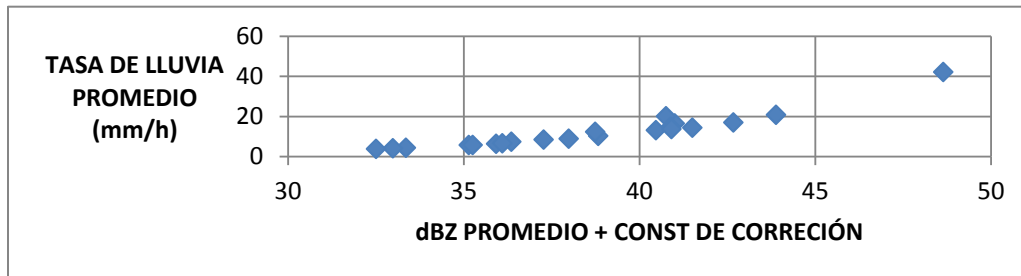
## APOPA

Tabla 7.6.4: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
09:00	0	0	0
09:15	0.089441509	0.624150204	0.6
09:30	0.213555038	1.490252368	0.6
09:45	0.411705708	2.873008349	0.6
10:00	0.488776371	3.410831008	2.2
10:15	0.729822172	5.092922328	8.6
10:30	1.234047328	8.611559685	12
10:45	1.41101256	9.846477197	12.2
11:00	1.464507393	10.21978051	12.2
11:15	1.464507393	10.21978051	12.2
11:30	1.612894961	11.25527434	12.2
11:45	1.771011582	12.35866048	14
12:00	1.975072123	13.78265735	15.4
12:15	2.224692224	15.52458276	18.2
12:30	2.332135193	16.27435266	19.2
12:45	2.382648404	16.62684929	19.6
13:00	2.382648404	16.62684929	19.8
13:15	2.547592117	17.77787697	20.4
13:30	2.649590065	18.48964985	20.8
13:45	2.719378007	18.97665145	21.2
14:00	2.892316873	20.18347175	21.6
14:15	2.972530013	20.74322358	21.8
14:30	3.042539045	21.23176801	21.8
14:45	3.089331411	21.55829945	21.8
15:00	3.089331411	21.55829945	21.8



Grafica 7.6.7: Curvas de lluvia acumulada (mm).



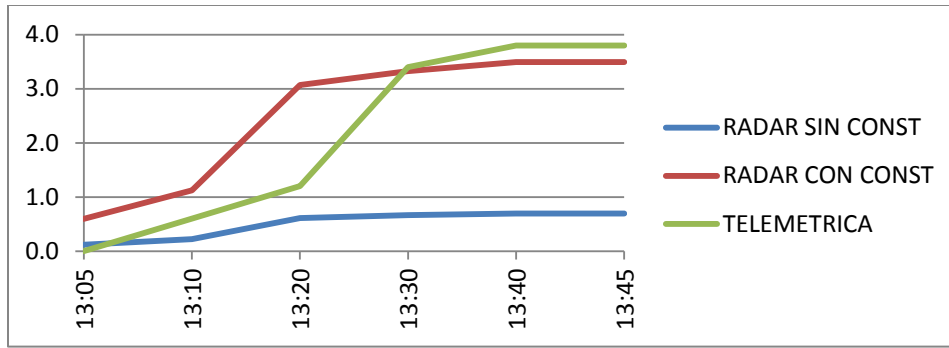
Grafica 7.6.8: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.7 CASO 8: 06 DE OCTUBRE DE 2013

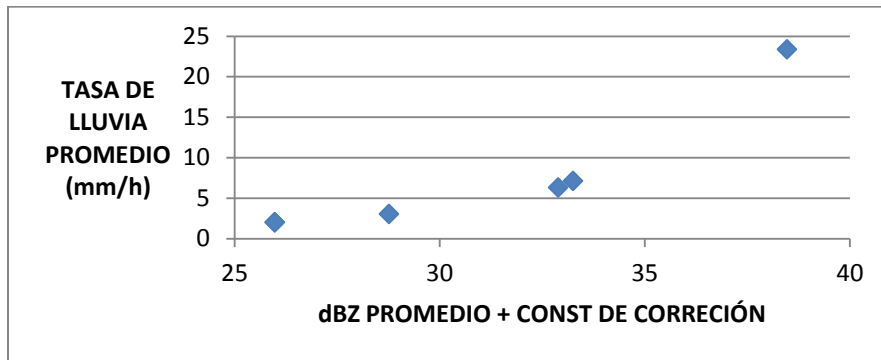
### BELLOSO

Tabla 7.7.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
13:05	0.1	0.6	0.0
13:10	0.2	1.1	0.6
13:20	0.6	3.1	1.2
13:30	0.7	3.3	3.4
13:40	0.7	3.5	3.8
13:45	0.7	3.5	3.8



Grafica 7.7.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

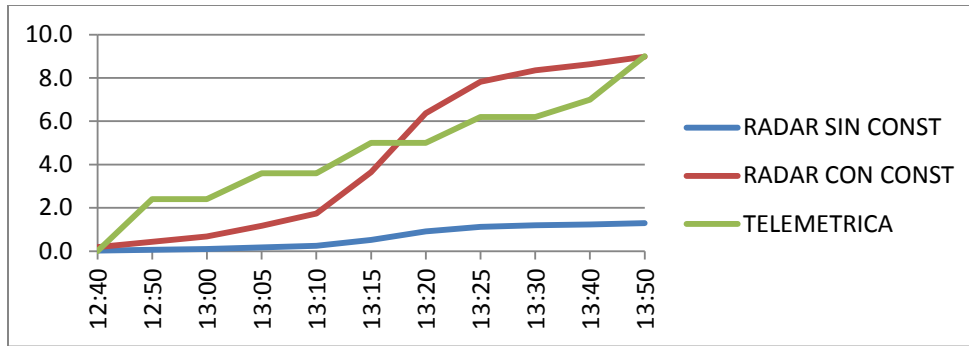


Grafica 7.7.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

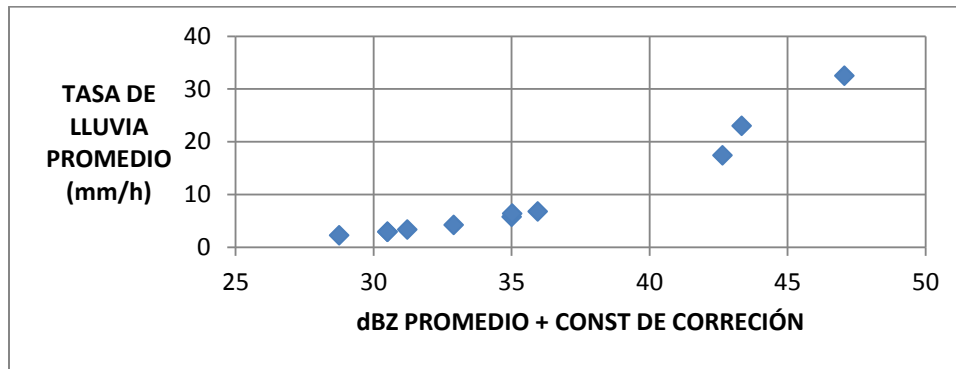
## PICACHO

Tabla 7.7.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
12:40	0.0	0.2	0.0
12:50	0.1	0.4	2.4
13:00	0.1	0.7	2.4
13:05	0.2	1.2	3.6
13:10	0.2	1.7	3.6
13:15	0.5	3.7	5.0
13:20	0.9	6.4	5.0
13:25	1.1	7.8	6.2
13:30	1.2	8.3	6.2
13:40	1.2	8.6	7.0
13:50	1.3	9.0	9.0



Grafica 7.7.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).



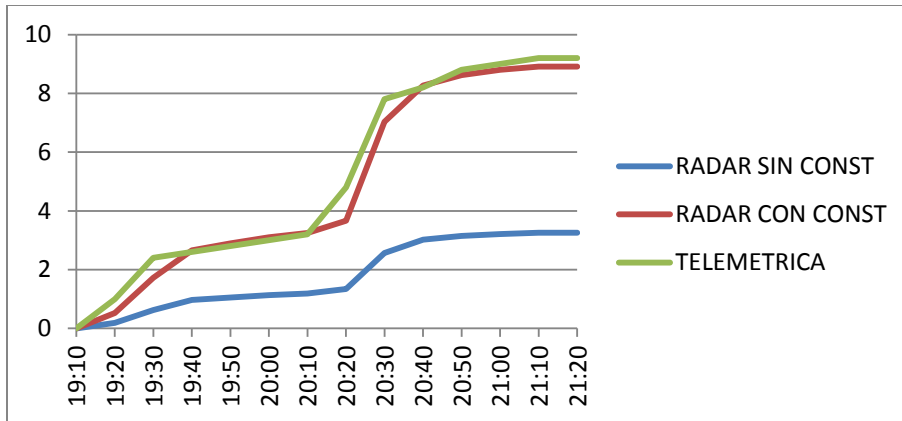
Grafica 7.7.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.8 CASO 9: 11 DE OCTUBRE DE 2013

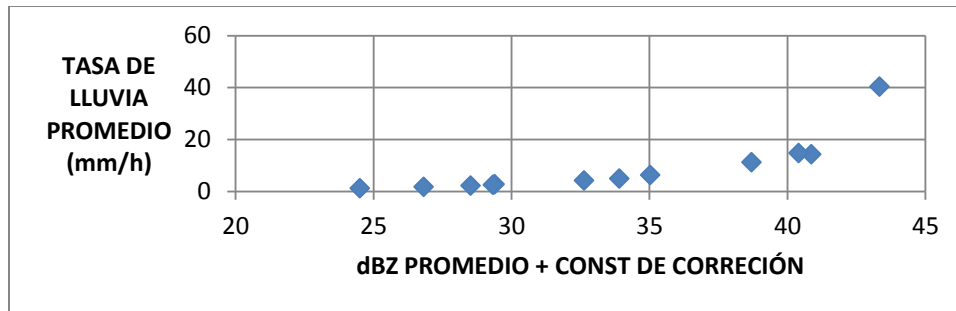
### ILOPANGO

Tabla 7.8.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:10	0	0	0
19:20	0.192841846	0.528081897	1
19:30	0.628752615	1.721788507	2.4
19:40	0.971307766	2.659848256	2.6
19:50	1.055792275	2.891202295	2.8
20:00	1.133646219	3.104399065	3
20:10	1.187758901	3.252582295	3.2
20:20	1.33887295	3.666395974	4.8
20:30	2.567666228	7.031347614	7.8
20:40	3.017999268	8.26454845	8.2
20:50	3.146537069	8.61653889	8.8
21:00	3.215057739	8.804177238	9
21:10	3.252765002	8.907435546	9.2
21:20	3.252765002	8.907435546	9.2



Grafica 7.8.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).

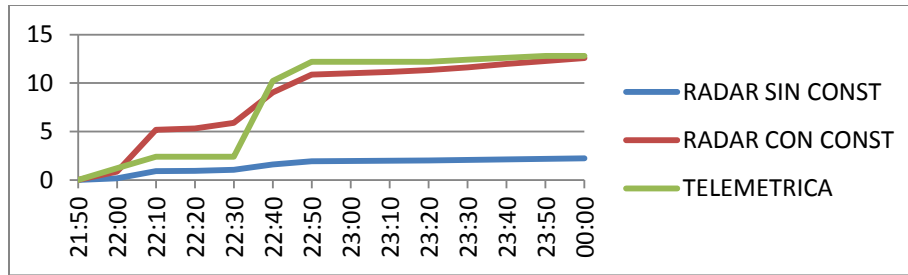


Grafica 7.8.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

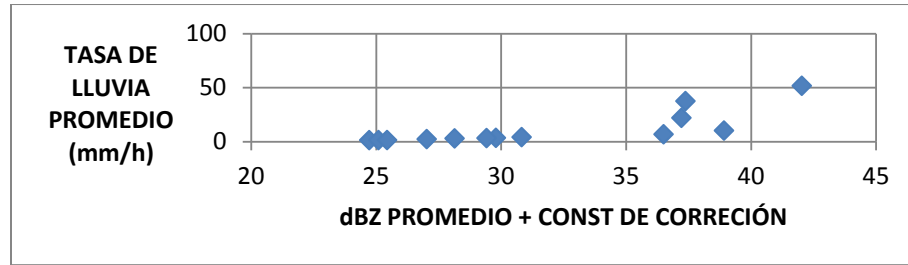
## BELLOSO

Tabla 7.8.2: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
21:50	0	0	0
22:00	0.154043839	0.866252168	1.2
22:10	0.921676661	5.182968748	2.4
22:20	0.94451037	5.311372131	2.4
22:30	1.047768678	5.892036272	2.4
22:40	1.605583769	9.028861044	10.2
22:50	1.934073846	10.87609649	12.2
23:00	1.957624776	11.00853311	12.2
23:10	1.981578081	11.14323244	12.2
23:20	2.018948832	11.35338361	12.2
23:30	2.065715707	11.61637308	12.4
23:40	2.130101826	11.97844284	12.6
23:50	2.184410602	12.28384353	12.8
00:00	2.235697192	12.57224922	12.8



Grafica 7.8.3: Curvas de lluvia acumulada (mm).

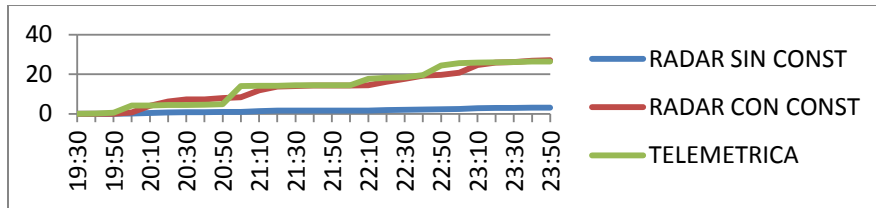


Grafica 7.8.4: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

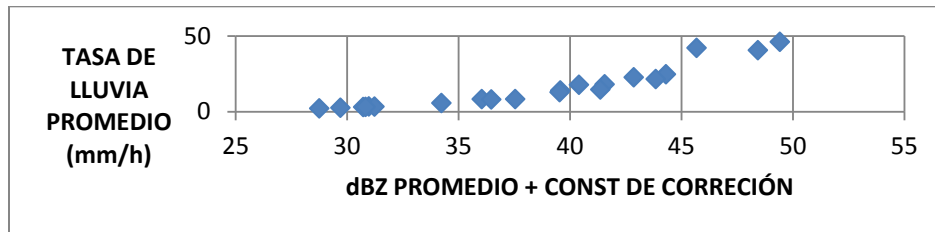
## PROCAFE

Tabla 7.8.3: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:30	0	0	0
19:40	0	0	0.2
19:50	0	0	0.6
20:00	0.080755348	0.699312501	4.2
20:10	0.471626479	4.084117047	4.2
20:20	0.709936571	6.14779742	4.4
20:30	0.845496354	7.32169678	4.4
20:40	0.845496354	7.32169678	4.6
20:50	0.924111084	8.002472298	4.8
21:00	0.958442788	8.2997726	14
21:10	1.36403457	11.81205274	14.2
21:20	1.58309261	13.70901721	14.2
21:30	1.616347147	13.99698964	14.4
21:40	1.642311892	14.22183506	14.4
21:50	1.642311892	14.22183506	14.4
22:00	1.642311892	14.22183506	14.4
22:10	1.664293022	14.4121838	17.6
22:20	1.872163097	16.21226449	18.2
22:30	2.043683728	17.69757197	18.4
22:40	2.21828059	19.2095185	19.6
22:50	2.274223229	19.69396179	24.4
23:00	2.398945538	20.77401249	25.6
23:10	2.842804204	24.61767019	25.8
23:20	2.984387282	25.84372913	26
23:30	3.015080368	26.10952031	26.2
23:40	3.09599856	26.81024298	26.4
23:50	3.127419863	27.08234026	26.4



Grafica 7.8.5: Curvas de lluvia acumulada (mm).

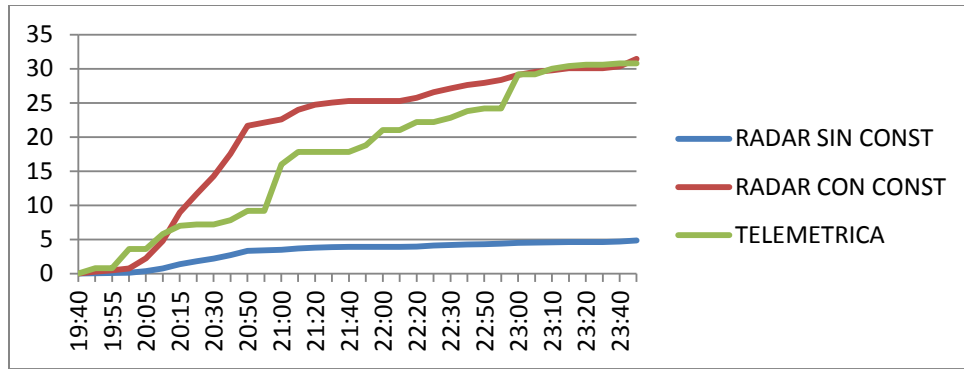


Grafica 7.8.6: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

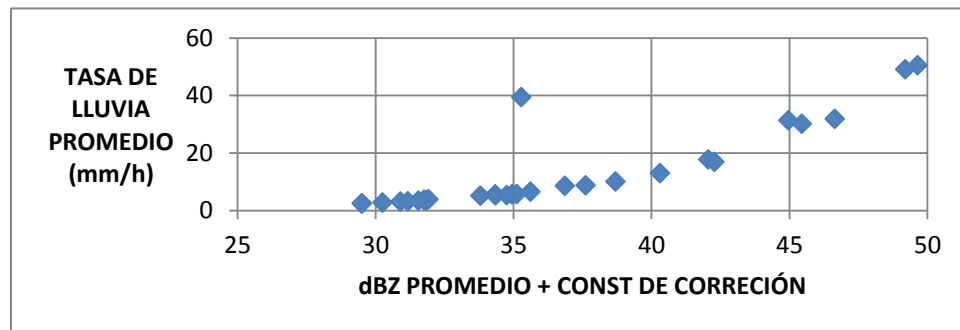
## PICACHO

Tabla 7.8.4: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:40	0	0	0
19:50	0.040776634	0.264795971	0.8
19:55	0.073504942	0.477327591	0.8
20:00	0.115900449	0.752636229	3.6
20:05	0.344632719	2.237981573	3.6
20:10	0.732369041	4.75587003	5.8
20:15	1.380978551	8.967821049	7
20:20	1.790484554	11.62707781	7.2
20:30	2.193636717	14.2450739	7.2
20:40	2.700279788	17.53512095	7.8
20:50	3.330860765	21.62999798	9.2
20:55	3.404119595	22.10572737	9.2
21:00	3.47854032	22.58900188	16
21:10	3.696494105	24.00435373	17.8
21:20	3.807600328	24.72585713	17.8
21:30	3.85861457	25.05713425	17.8
21:40	3.894989319	25.29334519	17.8
21:50	3.894989319	25.29334519	18.8
22:00	3.894989319	25.29334519	21
22:10	3.894989319	25.29334519	21
22:20	3.962008613	25.72855617	22.2
22:25	4.092240198	26.57425617	22.2
22:30	4.17727617	27.12646415	22.8
22:40	4.250323088	27.60081742	23.8
22:50	4.298829235	27.91580743	24.2
22:55	4.367523535	28.36189559	24.2
23:00	4.480828911	29.09767989	29.2
23:05	4.550339346	29.54906789	29.2
23:10	4.583006581	29.76120291	30
23:15	4.6299376	30.06596433	30.4
23:20	4.6299376	30.06596433	30.6
23:30	4.6299376	30.06596433	30.6
23:40	4.675122934	30.35938959	30.8
23:50	4.842835925	31.44848695	30.8



Grafica 7.8.7: Curvas de lluvia acumulada (mm).

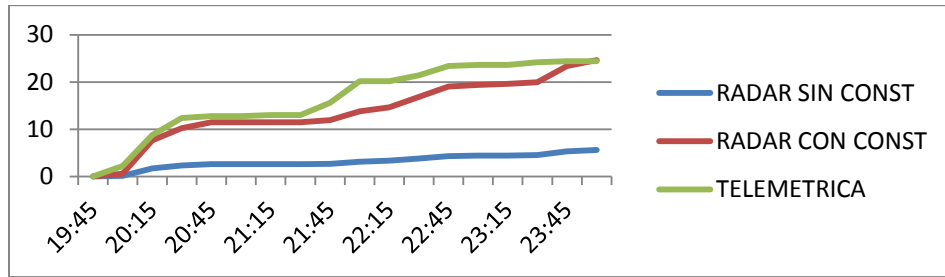


Grafica 7.8.8: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

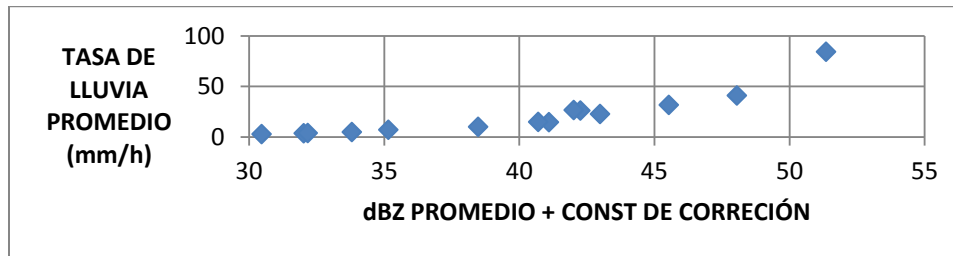
## APOPA

Tabla 7.8.5: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
19:45	0	0	0
20:00	0.136290532	0.600089028	2.2
20:15	1.731812672	7.625194274	8.8
20:30	2.332708381	10.27094609	12.4
20:45	2.611123995	11.49681375	12.8
21:00	2.611123995	11.49681375	12.8
21:15	2.611123995	11.49681375	13
21:30	2.611123995	11.49681375	13
21:45	2.704960482	11.90997705	15.6
22:00	3.136237734	13.80889654	20.2
22:15	3.328049757	14.65344743	20.2
22:30	3.824035671	16.83728002	21.4
22:45	4.32918723	19.06146907	23.4
23:00	4.400144297	19.37389398	23.6
23:15	4.455721953	19.61860314	23.6
23:30	4.531121526	19.95058847	24.2
23:45	5.308312152	23.37256915	24.4
00:00	5.591900842	24.62121393	24.4



Grafica 7.8.9: Curvas de lluvia acumulada (mm).



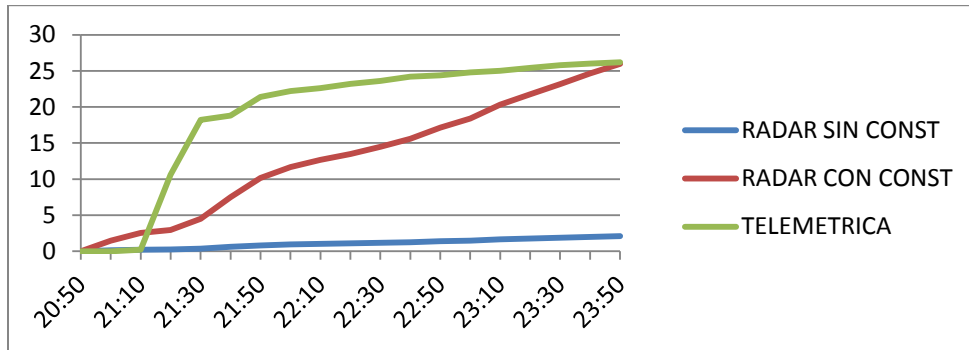
Grafica 7.8.10: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

## 7.9 CASO 10: 14 DE NOVIEMBRE DE 2013

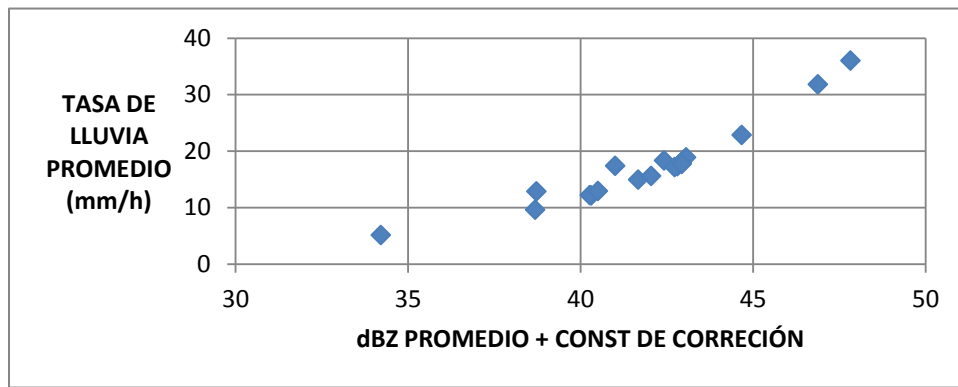
### PROCAFE

Tabla 7.9.1: Lluvia acumulada (mm).

HORA	RADAR SIN CONST	RADAR CON CONST	TELEMETRICA
20:50	0	0	0
21:00	0.116940507	1.451158914	0
21:10	0.203520764	2.525566011	0.2
21:20	0.238198976	2.955901035	10.6
21:30	0.361522317	4.486266951	18.2
21:40	0.603536595	7.489513508	18.8
21:50	0.817313184	10.14234792	21.4
22:00	0.938862498	11.65069926	22.2
22:10	1.020638773	12.66549194	22.6
22:20	1.085417319	13.46935337	23.2
22:30	1.167527887	14.48829442	23.6
22:40	1.254559037	15.56829682	24.2
22:50	1.381592016	17.14469702	24.4
23:00	1.482132076	18.39233659	24.8
23:10	1.635732077	20.29841701	25
23:20	1.752300776	21.74496202	25.4
23:30	1.867788344	23.17809085	25.8
23:40	1.986952979	24.65684981	26
23:50	2.09188383	25.95897635	26.2



Grafica 7.9.1: Curvas de lluvia acumulada (mm).



Grafica 7.9.2: Gráfica de dispersión de reflectividad de radar (dBz) vs intensidad de lluvia (mm/h).

---

## **7.10 DOCUMENTO SAT**



"UNÁMONOS PARA CRECER"

**Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales**  
**Dirección General del Observatorio Ambiental**  
**Centro de Pronóstico Meteorológico**



# Sistema de Alerta Temprana utilizando la red de radares LAWR de el salvador

---

Septiembre/2014

# Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

---

## Presentación

Una herramienta fundamental derivada del monitoreo permanente de fenómenos atmosféricos y otras amenazas naturales son los Sistemas de Alerta Temprana (SAT), debido a que estos contribuyen a la prevención de pérdida de vidas humanas y a la vez a la disminución del impacto económico ante este tipo de amenazas. Estos SATs permiten que las autoridades encargadas de la seguridad ciudadana, comités de seguridad locales y la población en general esté informada rápidamente y de manera responsable ante fenómenos naturales que pudieran representar una amenaza.

Lo fundamental para la eficacia de un SAT se basa en el conocimiento del tipo de riesgo para el cual se quiere implementar, además de una comunicación eficaz y participación activa de los entes involucrados ante cualquier amenaza, el equipamiento tecnológico, personal técnico-científico y voluntarios locales, así como también del compromiso institucional para divulgar la información a la población y su pronta actuación.

El propósito de este SAT es servir como referencia o manual operativo para el Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM) y al Observatorio Ambiental, muy particularmente a aquellas personas involucradas en el monitoreo de fenómenos atmosféricos utilizando radares meteorológicos de banda X, con la finalidad de alertar a Protección Civil y a la población en general de forma eficaz y oportuna en época lluviosa.

El principal objetivo de monitoreo y vigilancia de este SAT serán los sistemas atmosféricos que provoquen lluvias de fuerte intensidad y/o persistentes que pudieran provocar amenazas como inundaciones, crecidas repentinas de ríos y quebradas, deslizamientos y otras amenazas asociadas a este tipo de lluvias como son las tormentas con fuerte actividad eléctrica y con vientos rafagosos, ya que también estos fenómenos pueden causar daños entre la población.

## Equipo de Trabajo

### Equipo Técnico

- Manuel Ulises Pacheco Reyes  
Técnico en Alertamiento a Corto Plazo  
Dirección General Observatorio Ambiental (DGOA)
  
- Ángel de Jesús Lemus Reyes  
Técnico en Alertamiento a Corto Plazo  
Dirección General Observatorio Ambiental (DGOA)

### Equipo Científico-Técnico

- Lic. Lorena Rosaura Soriano  
  
Coordinadora Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM)  
Dirección General Observatorio Ambiental (DGOA)
  
- MSc. Luis García Guirola  
  
Gerente de Meteorología  
Dirección General Observatorio Ambiental (DGOA)
  
- Lic. Raúl Alfonso Alvarenga  
  
Escuela de Física  
Universidad de El Salvador

# Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

---

## AUTORIDADES

MSc. Lina Dolores Pohl Alfaro

Ministra de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Dr. Ángel María Ibarra

Vice-Ministro de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Msc. Celina Kattan Jokisch

Directora del Observatorio Ambiental

## Contenido

1. Introducción .....	1
2. MARCO DE REFERENCIA .....	2
2.1 ¿Qué es un SAT? .....	2
2.2 ¿Cuál es la importancia de un SAT? .....	2
2.3 ¿Cuál es el objetivo de un SAT? .....	2
2.4 ¿A qué eventos aplicamos un SAT? .....	2
2.5 Antecedentes.....	3
3. Sistema SAT LAWR.....	4
3.1 Hardware del sistema.....	4
3.2 Software y Flujo de Datos .....	5
4. Etapas y Procedimientos del SAT-LAWR.....	6
4.1 Etapas y acciones.....	7
4.2 Flujograma de Procedimientos .....	9

## 1. Introducción

El radar meteorológico de área local LAWR es un radar que está basado en la tecnología de banda X. El LAWR provee imágenes de radar de alta calidad, tanto de precipitaciones localizadas hasta en un área de 11.300 km<sup>2</sup> (con un alcance de 120 km) detectadas cada 5 minutos o cada minuto, según se requiera.

Las ventajas potenciales de los sistemas de radares de banda X, han suscitado un gran interés en la última década. La longitud de onda relativamente corta en esta banda de frecuencias, permite obtener una resolución bastante alta en la proyección de imagen del radar, para la identificación y discriminación del blanco, que en nuestro caso son gotas de lluvia. Las imágenes de radar de éste sistema propician que la vigilancia meteorológica sea más precisa y en tiempo real para el meteorólogo; además de estas ventajas existe la posibilidad de producir avisos oportunos de muy corto plazo y conocer mejor la distribución e intensidad de las lluvias en un área donde no se cuente con pluviómetros.

Para nuestro país los radares meteorológicos han fortalecido y mejorado las herramientas de monitoreo y vigilancia atmosféricas, sumándose al uso de imágenes satelitales, modelos numéricos y datos de superficie, por lo que estos radares son un valioso insumo para los sistemas de alerta temprana.

El Salvador cuenta con un sistema de 8 radares meteorológicos del tipo LAWR adquiridos por el MARN a través de la empresa DHI (Danish Hydraulic Institute). De los 8 radares meteorológicos, 3 de ellos (Santa Ana, San Salvador y San Miguel) se encuentran en operación desde el año 2010; la segunda fase de 3 radares (Sonsonate, La Laguna y Zacatecoluca) están en operación desde el año 2011. En el mes de octubre del año 2012 se instalaron 2 nuevos radares en Victoria (Cabañas) y Puerto Parada (Usulután).

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 ¿Qué es un SAT?

Los Sistemas de Alerta Temprana conocidos como SAT, son un conjunto de procedimientos e instrumentos, a través de los cuales se monitorea una amenaza o evento adverso (natural o humano) de carácter previsible, se recolectan y procesan datos e información, ofreciendo pronósticos o predicciones temporales sobre su acción y posibles efectos.

### 2.2 ¿Cuál es la importancia de un SAT?

La importancia de un SAT, radica en que permite conocer anticipadamente y con cierto nivel de certeza, en que tiempo y espacio, una amenaza o evento adverso de tipo natural o generado por la actividad humana puede desencadenar situaciones potencialmente peligrosas. Por lo cual las alertas deben difundirse con suficiente anticipación.

### 2.3 ¿Cuál es el objetivo de un SAT?

El objetivo fundamental de un SAT es, reducir o evitar la posibilidad que se produzcan lesiones personales, pérdidas de vidas, daños a los bienes y al ambiente, mediante la aplicación de medidas de protección y reducción de riesgos. Los Planes de Gestión de Riesgo o Respuesta de Emergencias son medidas indispensables para que una alerta sea efectiva

### 2.4 ¿A qué eventos aplicamos un SAT?

Los Sistemas de Alerta Temprana son aplicables tanto a eventos naturales, como aquellos provocados por la actividad humana y por la interacción de ambos elementos, cuyas características permiten su vigilancia y monitoreo. Entre las amenazas o eventos más comunes a los cuales se aplican tenemos las inundaciones, lluvias de fuerte intensidad y/o persistentes, deslizamientos de tierra, huracanes, volcanes, tsunamis, incendios forestales, fenómeno del niño y la niña, entre otros.

## 2.5 Antecedentes

Con base en la aplicación de la metodología de evaluación de desastres, desarrollada por la CEPAL desde 1972, se ha estimado que, además de sufrir lamentablemente pérdida de vidas humanas, el valor de los daños y pérdidas ocasionadas por el desastre de noviembre de 2009 en El Salvador, provocados por la Tormenta Tropical Ida, asciende a los 314.84 millones de dólares, lo que viene a representar el equivalente del 1.44% del producto interno bruto del país, este fue uno de los fenómenos que motivó la adquisición de los radares LAWR. (Tomado de <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/38598/2010-03-L957-w2.pdf>).

San Salvador, viernes 16 de julio de 2010. El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), instaló el primer radar LAWR para la estimación de lluvia con el propósito de alertar, a corto plazo, sobre la intensidad de lluvia en un lugar específico. Los radares LAWR son una herramienta tecnológica que viene a fortalecer el Sistema de Alerta Temprana ya existente, al generar información sobre en qué área en específico está lloviendo y con qué intensidad (fuerte, moderada o baja). Esta información se vuelve fundamental, principalmente, ante la incidencia de eventos súbitos y extremos, que en los últimos años, han afectado con mayor frecuencia al país. El sistema de radar complementa los instrumentos ya existentes como: las imágenes de satélite, los modelos matemáticos y las estaciones meteorológicas e hidrológicas.

El SAT LAWR está diseñado para el monitoreo con radares de banda X, además de la utilización de imágenes satelitales (visible, infrarroja y vapor de agua), observadores locales, así como también de la red meteorológica y pluviométrica, para proporcionar datos operativos meteorológicos a los 14 departamentos de El Salvador, y así poder emitir alertas efectivas de lluvias débiles, moderadas y fuertes.

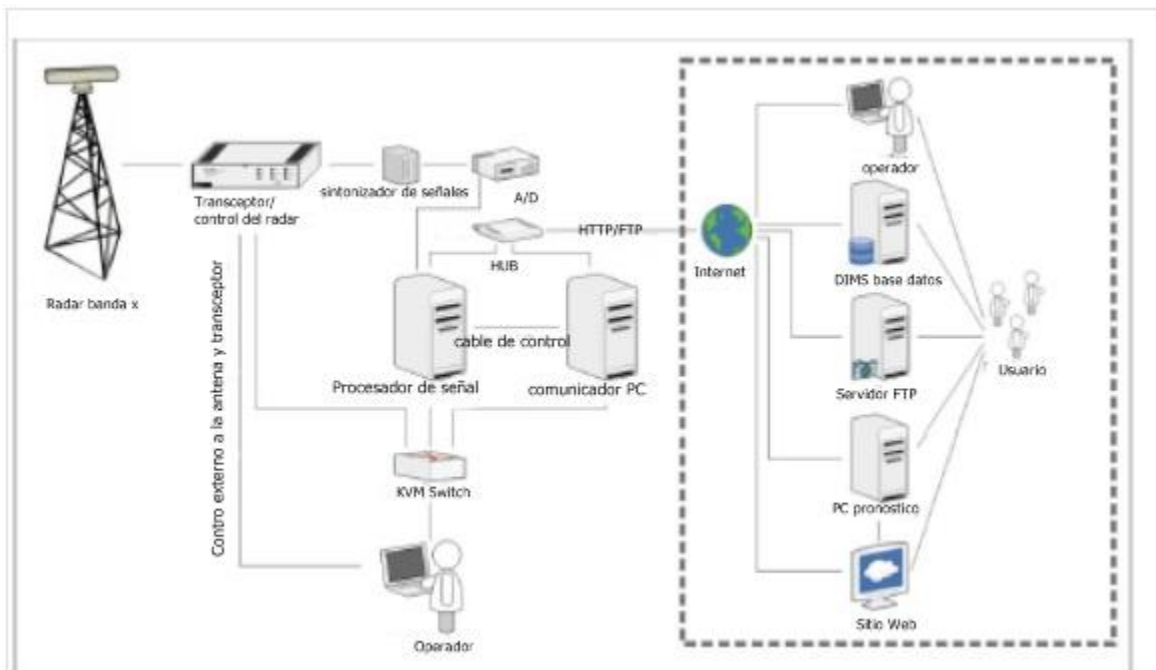
La implementación del sistema comprendió la construcción de una red de radares meteorológicos, que se complementaron con la red de estaciones hidrometeorológicas en tiempo real. El equipo de radares fue financiado por el Programa Nacional de Reducción de Riesgo (PNRR), incluyó la instalación del equipo, software y capacitaciones para la creación del grupo

de monitoreo de radares para integrarse al Centro de Pronóstico Meteorológico (CPM) de la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA).

### 3. Sistema SAT LAWR

#### 3.1 Hardware del sistema

LAWR se basa en un radar estándar marino Furuno X-Band (FAR-2127) modificado, operado a control remoto por dos PC que además manejan el procesamiento de señales y la comunicación con otros usuarios. El diseño del sistema y de los componentes incluidos se describe en la Figura 1 junto con un conjunto de módulos de complemento opcional (dentro del marco de trazos).



**Figura 1:** Diseño de un sistema de radar de área local. Fuente: DHI.

El radar Furuno ha sido modificado por la instalación de un panel de control que permite la unidad de procesamiento para operar los controles de radar. Desde el conector esclavo de salida estándar del radar, el procesador de señal recoge tanto el video "crudo" y la información direccional. La misma conexión sostiene los cables para la operación remota del radar.

Las especificaciones técnicas del radar son mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Especificaciones técnicas del radar LAWR, resolución espacial y temporal

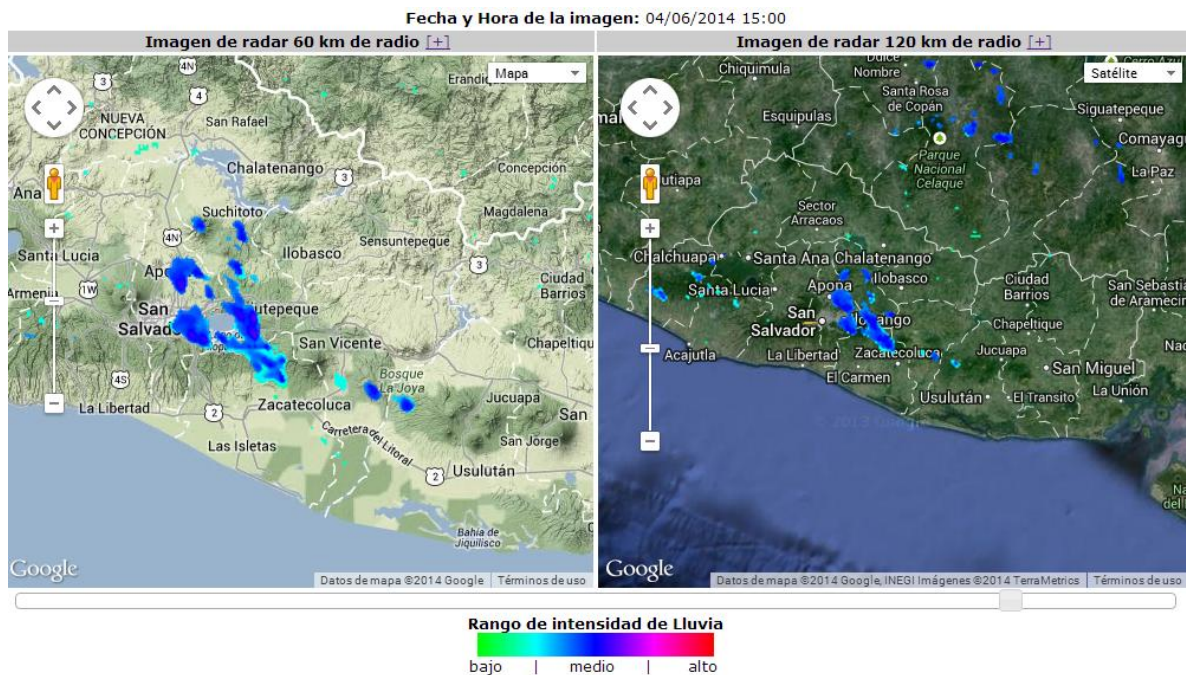
Parámetro	LAWR (FURUNO FAR2127)
Potencia Pico	25kW*
Banda	X-Band
Frecuencia	9.41 GHz $\pm$ 30MHz
Longitud de onda	3.2cm
Longitud de Pulso	0.8-1.2 $\mu$ s
Bin Length (Longitud de muestra)	120m
Antena	2.5m
Receptor	Receptor logarítmico
Angulo de apertura vertical	$\pm$ 10°
Angulo de apertura horizontal	0.95°
Muestras por rotación	360
Rango/Pronostico y calibración	60/20km
Resolución Espacial	500x500 m (rango 60km) 250x250 m (rango 30km) 300x300 m (rango 15km) ** 100x100 m (rango 15km) **
Resolución Temporal	1 o 5 min
Estrategia de Escaneo	Una sola capa y escaneo continuo

\* La potencia pico efectiva del haz se estable como 12.5 kW debido a que la otra mitad del haz se pierde en el filtro del eco terrestre.\*\*No usados en este estudio.

### 3.2 Software y Flujo de Datos

Cada LAWR recibe un nombre de cuatro letras (XXXX) que, combinado con la indicación de la hora (HHMM) da el nombre de archivo. Por ejemplo el radar en San Salvador es nombrado Sal1 así un archivo de salida para el lapso de tiempo entre 12.50 y 12.55 se almacena en el archivo Sal11255.p00.

Las imágenes de radar del sistema son difundidas por el Departamento de Informática del MARN y son transmitidos al Centro de Pronóstico Meteorológico e Hidrológico (CPM Y CPH), al Centro de Monitoreo de Amenazas en general y agencias de Protección Civil, según proceda. Las trayectorias de difusión de los productos del sistema, actualizados cada 5min (imágenes de radar de intensidad de lluvia), aparecen ilustradas en la Figura 2. Existen varios niveles de detalle según sea apropiado, esto se puede lograr haciendo zoom en las imágenes, y se cuenta con dos radios de alcance: 60km y 120km.



**Figura 2:** Contraste entre imagen de 60km (izquierda) y 120km (derecha).

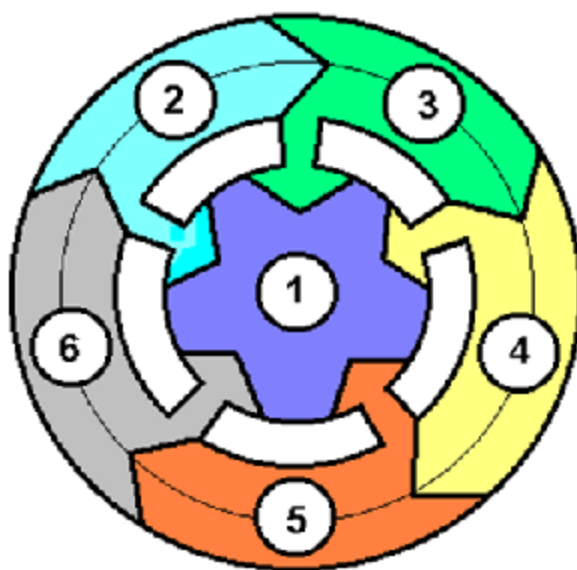
#### 4. Etapas y Procedimientos del SAT-LAWR

Las etapas y procedimientos de este SAT están enfocadas en el monitoreo y vigilancia de sistemas atmosféricos que producen lluvias de diferentes intensidades, distribuciones espaciales y temporales en El Salvador, pero sobre todo aquellas lluvias de rápido desarrollo, de moderada a fuerte intensidad y/o persistentes. Además es un SAT operado desde el Centro de Monitoreo de Amenazas (CMA) pero que estará muy bien vinculado hacia diferentes niveles (nacional,

departamental, municipal y local) a través de la comunicación con Protección Civil, autoridades ministeriales, redes sociales y voluntarios locales, entre otros.

#### 4.1 Etapas y acciones

Para el funcionamiento de este SAT se pueden definir 6 etapas principales, con sus acciones o actividades correspondientes y recursos o herramientas. En la figura 3 se muestra un diagrama que simboliza el carácter de funcionamiento permanente de este SAT y la interconexión de sus etapas.



*Figura 3:* Diagrama de las Etapas del SAT.

##### 1. Monitoreo y vigilancia permanente:

Se mantendrá continuo monitoreo y vigilancia de los sistemas atmosféricos sobre territorio salvadoreño y/o externos que puedan causar afectaciones debido a la producción de lluvias de fuerte intensidad, repentinas y/o persistentes. Este monitoreo se realizará empleando no sólo las imágenes provistas por la red de radares LAWR sino también por los demás recursos que funcionan acoplados a este SAT como son: pronósticos meteorológicos, modelos meteorológicos globales y mesosescalares, imágenes satelitales, estaciones telemétricas, estaciones aerosinópticas, reportes metar, observadores locales, redes sociales, entre otros.

## **2. Análisis del Pronóstico Meteorológico:**

Se debe realizar una revisión y análisis del pronóstico meteorológico vigente para el turno de monitoreo y vigilancia a desarrollar. Esta revisión y análisis se discute con el meteorólogo pronosticador de turno para evaluar los sistemas atmosféricos que se prevén para el turno diurno o nocturno que se esté llevando a cabo.

Consultar modelos meteorológicos globales o mesoescales con tiempo más actualizado para corroborar pronóstico previo.

## **3. Observación y verificación de imágenes de radar:**

Observar si las imágenes de radar presentan ecos asociados a lluvias sobre el territorio nacional, si el tiempo aún es estable se continuará con el monitoreo. Si los radares presentan ecos de lluvias sobre alguna región del país se analizarán estas imágenes para obtener la intensidad de las lluvias, área de influencia, su trayectoria y tiempo estimado de arribo a zonas de interés.

- Verificar estas imágenes por medio de la red telemétrica en cuanto la intensidad de lluvia y lluvia acumulada.
- Revisar reportes metar u reportes de observadores locales respecto a las lluvias observadas.
- Observar y analizar imágenes de satelitales para verificar el sistema nuboso que está produciendo las lluvias observadas.

## **4. Redacción de alerta (Pronóstico de muy corto plazo):**

Se redacta una alerta en formato de Pronóstico de muy corto Plazo. Este pronóstico debe contener la siguiente información:

- Primero se detallan las lluvias que se están observando por medio de las imágenes de radar: intensidad de las lluvias, distribución de las lluvias (aisladas, dispersas, generalizadas), área de influencia.
- Luego se describe su trayectoria estimada, es decir, se mencionan las zonas donde se espera que se desplacen las lluvias y un tiempo estimado de arribo. Se hace énfasis si se trata de una zona o área vulnerable.

- Es posible mencionar los valores de lluvia acumulada esperada con las lluvias que se están monitoreando, esto es necesario consultarlo con el meteorólogo pronosticador y revisar modelos meteorológicos.

#### **5. Difusión de la alerta:**

Se difunde la alerta utilizando los diferentes medios provistos por el CMA:

- Envío de la alerta por medio de mensajes de texto hacia teléfonos móviles de autoridades del MARN.
- Envío de este mensaje vía Twitter para su difusión a través de redes sociales.
- Comunicación vía radio con Protección Civil describiendo la alerta. Además es posible por este medio contestar interrogantes de las autoridades y al mismo tiempo pedir reportes de sus observadores locales.

#### **6. Reevaluación periódica de la evolución de las lluvias:**

Se evalúa la evolución de las lluvias y del sistema que las produce, para esto se deben considerar los siguientes parámetros:

- Persistencia de las lluvias: se evalúa el tiempo de permanencia de las lluvias en un área determinada.
- Cambio de la intensidad de las lluvias: se evalúan los cambios de intensidad en las lluvias monitoreadas.
- Cambio de la zona de influencia y/o su trayectoria.
- Registros de lluvia acumulada: se revisan los registros de la red de estaciones telemétricas para verificar los valores de lluvia acumulada.

Si se cumple una de estas condiciones se emite una nueva alerta con la actualización de la evolución de las lluvias que están siendo monitoreadas.

### **4.2 Flujograma de Procedimientos**

En la figura 4, se presenta un flujograma donde se puede observar como proceder con las actividades antes descritas en las etapas del SAT.

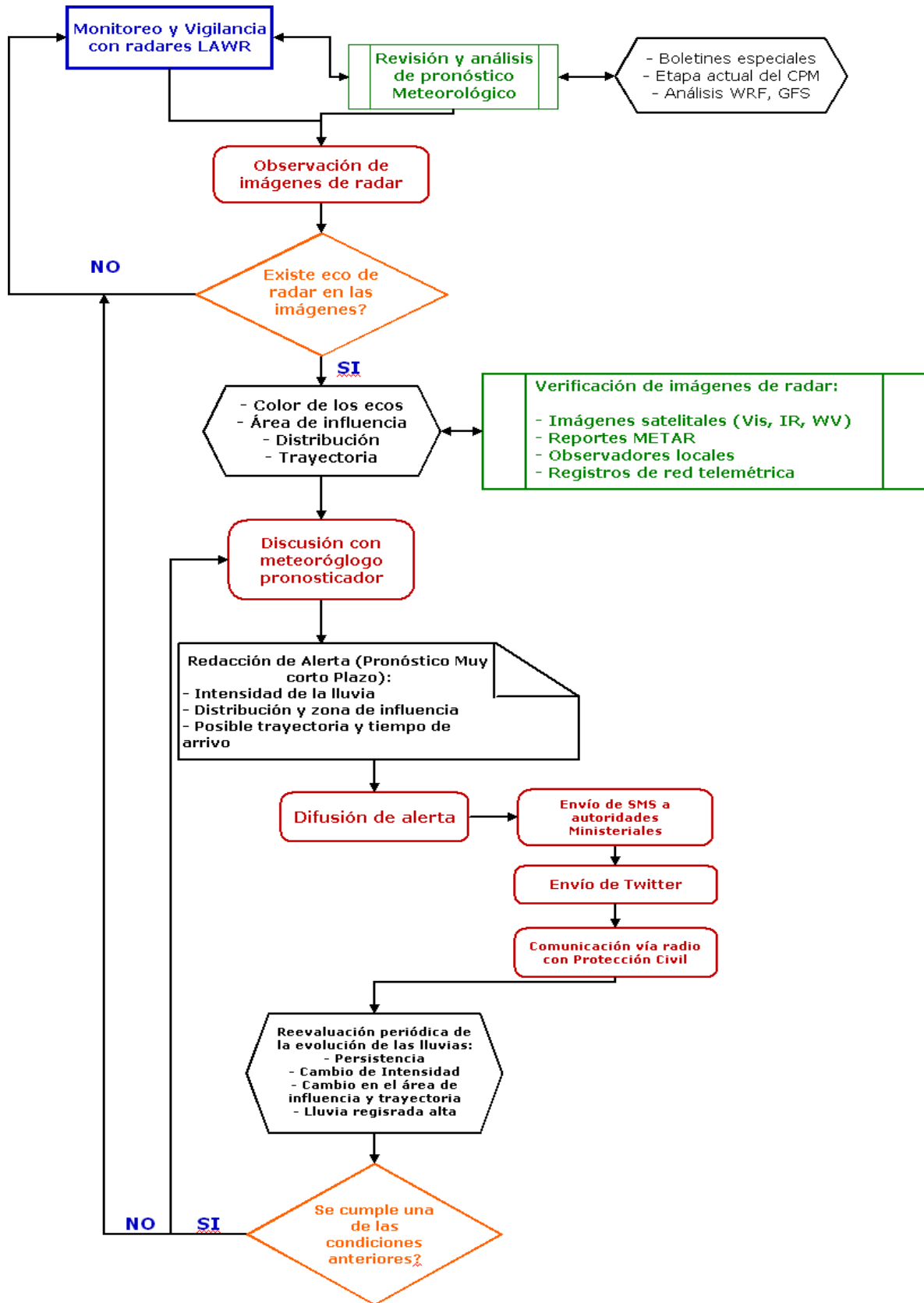


Figura 4: Flujoograma de procedimientos de este SAT.