



**INFORME TÉCNICO ANUAL DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA DEL SEGMENTO
VOLCÁNICO NORTE DE COLOMBIA.**

Manizales, 2016



RESUMEN

La actividad del Segmento Volcánico Norte de Colombia durante el año de 2015, conservó los niveles de actividad hasta el momento establecidos. Los volcanes Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel y Cerro Machín, continuaron mostrando un comportamiento variable en su actividad y los demás edificios volcánicos mostraron un comportamiento estable.

El volcán Nevado del Ruiz (VNR) continuó presentando cambios importantes y mostró un mayor grado de inestabilidad con respecto al año anterior. El 2015 estuvo caracterizado por el registro frecuente de señales sísmicas relacionadas principalmente con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos y en menor proporción, sin ser por ello menos importante, por sismicidad asociada con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica en el VNR. La actividad de fluidos al interior de los conductos volcánicos, mostró un incremento importante tanto en el número de eventos como en los desplazamientos reducidos y la duración de éstos, siguiendo así la evolución del proceso volcánico iniciado a partir del 18 Noviembre de 2014. Como consecuencia del incremento en la actividad de fluidos, se registraron a través de todo el año y reiteradamente, episodios de tremor volcánico continuo de corta (horas a días) y larga duración (días a semanas), en ocasiones de carácter espasmódico y a partir de Septiembre, principalmente pulsos de tremor de niveles energéticos importantes, señales múltiples de fluido y de periodo muy largo. Todas estas estuvieron señales asociadas a limpieza de conductos y emisiones de ceniza a la atmósfera. Estas emisiones fueron confirmadas mediante fotografías, reportes de los habitantes en las inmediaciones del volcán y municipios aledaños, imágenes satelitales, entre otros. En cuanto a la actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca, continuó presentando una tasa importante de ocurrencia de eventos, pero en menor proporción que el año 2014. En el mes de Noviembre se registró el mayor número de eventos (4914) y en el mes de Octubre la magnitud máxima alcanzada en el año de 3.3 M_L . Este tipo de actividad estuvo localizada en la mayoría de fuentes sismogénicas asociadas al volcán, a profundidades que oscilaron entre 0.1 (en proximidades del cráter) y 10.5 km (en sectores distales del edificio volcánico, sector Norte-Noroccidente distal), con un predominio de eventos tipo VT a profundidades entre 3.0 y 4.0 km. Varios episodios de sismicidad tipo *drumbeat* o “golpes de tambor”, fueron registrados por primera vez en lo que se conoce de la actividad sísmica reciente del VNR. Estos episodios de sismicidad periódica tipo VT fueron discretos, de muy corta duración y de niveles energéticos bajos a muy bajos. En conjunto la actividad sísmica registrada durante el año en el VNR, manifestó la salida de un volumen pequeño de material magmático o domo de lava a la superficie del cráter Arenas, que fue detectado en imágenes de radar COSMO-SkyMed de la Agencia Italiana Espacial (ASI) a partir de Septiembre y, a pesar de los esfuerzos realizados por el Servicio Geológico Colombiano para tener una observación directa del domo a través de varios sobrevuelos, las condiciones atmosféricas y la dinámica de columna de gases (densa y espesa) no ha permitido hasta el momento de elaboración de este informe la observación directa de dicho fenómeno, que continua en evolución.

El volcán Cerro Machín (VCM) presentó actividad sísmica de tipo VT asociada a

fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, mostrando disminución tanto en número y energía sísmica liberada con respecto al 2014. Los sismos se localizaron principalmente en el domo principal y al Suroccidente del mismo, a profundidades entre 1.8 y 4.8 km, al Suroriente (fuente distal entre 7 y 9 km de distancia al domo) a profundidades entre 8.0 y 16 km y en menor proporción hacia el sector Suroriental y Nororiental, a profundidades entre 1.5 y 9.0 km. La máxima magnitud registrada durante el año fue de 3.0 M_L (magnitud local), asociada a dos sismos ocurridos el 22 de Diciembre a las 06:09 y 06:22 (hora local), respectivamente, durante un incremento sísmico.

En los edificios volcánicos como en el Nevado de Santa Isabel y el Paramillo de Santa Rosa, se observó con respecto al año anterior, una disminución en la actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca, mientras los Paramillos del Cisne y Quindío se destacaron por mostrar incrementos importantes en tal actividad.



Los otros edificios volcánicos como Cerro Bravo, San Diego, Romeral y Tolima no mostraron variaciones importantes en los parámetros monitoreados.

Con relación a los demás parámetros monitoreados en los volcanes, se observó en el volcán Nevado del Ruiz, algunos cambios en la deformación del volcán, así como en los parámetros fisicoquímicos monitoreados. Los demás edificios volcánicos no mostraron cambios en dichos parámetros.

Con base en la evaluación integral de los parámetros que se monitorean continuamente, se concluye que continúan en NIVEL AMARILLO ■ (o III): Cambios en el comportamiento de la actividad volcánica los volcanes Nevado del Ruiz y Cerro Machín, y en NIVEL VERDE ● (o IV): Volcán activo y comportamiento estable, los volcanes Nevado del Tolima, Cerro Bravo, Nevado Santa Isabel, Paramillo del Cisne, Paramillo del Quindío, Paramillo de Santa Rosa, San Diego y Romeral.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ (VNR)	3
1.1 RED DE VIGILANCIA	3
1.2 SISMOLOGÍA.....	5
1.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT).....	8
1.2.2 Sismicidad tipo drumbeat (DB).....	16
1.2.3 Sismos híbridos (HB).....	20
1.2.4 Sismos de largo período (LP).....	21
1.2.5 Pulsos de tremor y tremor volcánico continuo (TR y TC)	31
1.2.6 Actividad superficial (la columna de gas y señales sísmicas asociadas a la actividad glacial) 39	
1.3 DEFORMACIÓN.....	43
1.4 GEOQUÍMICA	48
1.4.1 Emisiones de SO ₂ en Estaciones DOAS.....	49
1.4.2 Medidas Móviles de SO ₂	57
1.4.3 Emisiones de Gas Radón.....	59
1.4.4 Fuentes Termales (FT)	61
1.4.5 Gases en Botellas de Giggenbach.....	64
2. VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA (VNT).....	66
2.1 RED DE VIGILANCIA	66
2.2 SISMOLOGÍA.....	66
2.2.1 Señales asociadas a la actividad glacial	69
2.3 DEFORMACIÓN.....	69
3. VOLCÁN CERRO MACHÍN (VCM)	71
3.1 RED DE VIGILANCIA	71
3.2 SISMOLOGÍA.....	72
3.2.1 Sismos volcano-tectónicos.....	72
3.3 OTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS	76
3.3.1 Magnetometría	76
3.4 DEFORMACIÓN.....	77
3.5 GEOQUÍMICA	80
3.5.1 Medidas de Gas Radón.....	81
3.5.2 Fuentes Termales (FT)	82
3.5.3 Termocupla FT-ESTATUAS	85
4. VOLCÁN CERRO BRAVO (VCB)	86
4.1 RED DE VIGILANCIA	86
4.2 SISMOLOGÍA.....	87
4.2.1 Sismos de Largo Período (LP)	87
4.2.2 Señales asociadas con actividad superficial.....	87
4.3 DEFORMACIÓN.....	89
5. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA (VPSR)	91
5.1 RED DE VIGILANCIA	91
5.2 SISMOLOGÍA	91

			
5.2.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	.....	91
5.3	GEOQUÍMICA	.....	94
5.3.1	Manantiales termales SAN VICENTE	.....	95
5.3.2	Manantiales termales SANTA ELENA	.....	97
5.3.3	Manantiales termales SANTA ROSA	.....	98
6.	VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL (VNSI)	.....	101
6.1	RED DE VIGILANCIA	.....	101
6.2	SISMOLOGÍA	.....	102
6.2.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	.....	102
6.2.2	Señales asociadas a la actividad glacial	.....	106
6.3	DEFORMACIÓN	.....	106
7.	VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE (VPC)	.....	108
7.1	SISMOLOGÍA	.....	108
7.1.1	Sismos volcano-tectónicos (VT)	.....	108
7.1.2	Sismos Híbridos (VT)	.....	110
8.	PARAMILLO DEL QUINDÍO (PQ)	.....	112
8.1	SISMOLOGÍA	.....	112
9.	VOLCÁN SAN DIEGO	.....	114
9.1	RED DE VIGILANCIA	.....	114
9.2	SISMOLOGÍA	.....	114
10.	VOLCÁN ROMERAL	.....	114
10.1	SISMOLOGÍA	.....	114
11.	VOLCÁN EL ESCONDIDO (VE)	.....	114
11.1	RED DE VIGILANCIA	.....	114
11.2	GEOQUÍMICA	.....	115
12.	ACTIVIDAD TECTÓNICA	.....	119
12.1	RED DE VIGILANCIA	.....	119
11.2.	SISMOLOGÍA	.....	119
	CONCLUSIONES	.....	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. RED DE VIGILANCIA COMPLEJO VOLCÁNICO NORTE DE COLOMBIA.....	2
FIGURA 2. DIGITALIZACIÓN DE ESTACIÓN MULTIPARAMÉTRICA DE LISA.....	3
FIGURA 3. CASETA REPETIDOR PITAYO.....	4
FIGURA 4. INSTALACIÓN BANCO BATERÍAS ESTACIÓN MULTIPARAMÉTRICA OLLETA2.....	4
FIGURA 5. RED SISMOLÓGICA. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.....	5
FIGURA 6. NÚMERO DE SISMOS DIARIOS TIPO VT, HB Y LP REGISTRADOS EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ, A) PERIODO 2010 – 2015 Y, B) PERIODO 2015.....	6
FIGURA 7. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA DIARIA LIBERADA POR EVENTOS TIPO VT Y HB EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. A) PERIODO 2010 – 2015 Y, B) PERIODO 2015.....	7
FIGURA 8. REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTROGRAMA ASOCIADO AL EVENTO SÍSMICO TIPO VT DE MAYOR ENERGÍA REGISTRADO EN EL VNR DURANTE EL AÑO 2015. SISMO OCURRIDO EL DÍA 11 DE OCTUBRE A LAS 08:02 (HORA LOCAL). ESTACIÓN OLLETA, COMPONENTE VERTICAL.....	8
FIGURA 9. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VNR DURANTE AÑO 2015. LOS CUADRADOS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS INSTALADAS EN EL ÁREA.....	9
FIGURA 10. INCREMENTO DE LA ACTIVIDAD DE FRACTURA EN EL VNR LOS DÍAS 04-05 DE NOVIEMBRE DE 2015. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS (IZQUIERDA), EN LOS CÍRCULOS AMARILLOS, LAS FUENTES SÍSMICAS ACTIVAS DURANTE EL INCREMENTO. SISMOGRAMA DE LAS SEÑALES SÍSMICAS REGISTRADAS DURANTE EL INCREMENTO (DERECHA).....	13
FIGURA 11. INCREMENTO DE LA ACTIVIDAD DE FRACTURA EN EL VNR EL DÍA 11 DE OCTUBRE DE 2015. A) MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS, EN CÍRCULO AMARILLO SECTORES SÍSMICOS EN EL VNR DURANTE EL INCREMENTO, Y EN CÍRCULO NARANJA LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS DE TIPO HB REGISTRADOS EN EL VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE (VPC) PRECEDIENDO EL INCREMENTO EN EL VNR. LOS COLORES CÁLIDOS REPRESENTAN SISMOS A PROFUNDIDADES MENORES DE <4 KM Y COLORES FRÍOS EVENTOS A PROFUNDIDADES MAYORES O IGUALES A ≥4 KM. B) SISMOGRAMA DE LAS SEÑALES SÍSMICAS REGISTRADAS DURANTE EL INCREMENTO. RECUADRO NARANJA: FORMA DE ONDA DE LOS SISMOS TIPO HB DEL VPC. RECUADRO AMARILLO: FORMA DE ONDA DE LOS SISMOS TIPO VT REGISTRADOS EN EL VNR (CÍRCULO ROJO) Y EN EL VNSI (CÍRCULO VERDE).....	14
FIGURA 12. EPISODIOS DE ACTIVIDAD SÍSMICA TIPO “DRUMBEAT” EN EL VNR REGISTRADOS EL DÍA 20 DE AGOSTO DE 2015 ENTRE LAS 14:00 Y 16:00 (HORA LOCAL). SISMOGRAMA DEL REGISTRO SÍSMICO DE LOS EPISODIOS EN LA COMPONENTE VERTICAL DE LA ESTACIÓN BIS (PARTE SUPERIOR, RECUADRO NARANJA). SISMOGRAMA DEL REGISTRO SÍSMICO DE LOS EPISODIOS TIPO “DRUMBEAT” ENTRE LAS 14:10 Y 14:48, EN LA COMPONENTE VERTICAL DE LA ESTACIÓN DE OLLETA (PARTE INFERIOR IZQUIERDA). SISMOGRAMA Y ESPECTROGRAMA DE DETALLE DE LAS SEÑALES REGISTRADAS (PARTE INFERIOR DERECHA), DONDE SE PUEDE APRECIAR LA PERIODICIDAD SIMILAR ENTRE LAS SEÑALES. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LAS SEÑALES REGISTRADAS LOCALIZABLES (PARTE INFERIOR DERECHA). NÓTESE QUE LOS EPISODIOS TIPO “DRUMBEAT” ANTECEDEN UNA SEÑAL MÚLTIPLE DE FLUIDO (LP+TR) DE LARGA DURACIÓN.....	17
FIGURA 13. EPISODIOS DE ACTIVIDAD SÍSMICA TIPO “DRUMBEAT” EN EL VNR REGISTRADOS EL DÍA 20 DE AGOSTO DE 2015 ENTRE LAS 14:00 Y 16:00 (HORA LOCAL). SISMOGRAMA DEL REGISTRO SÍSMICO DE LOS EPISODIOS EN LA COMPONENTE VERTICAL DE LA ESTACIÓN BIS (PARTE SUPERIOR, RECUADRO NARANJA). SISMOGRAMA DEL REGISTRO SÍSMICO DEL EPISODIO TIPO “DRUMBEAT” ENTRE LAS 15:36 Y 15:55, EN LA COMPONENTE VERTICAL DE LA ESTACIÓN DE OLLETA (PARTE INFERIOR IZQUIERDA). NÓTESE QUE LOS EPISODIOS TIPO “DRUMBEAT” ANTECEDEN UN SISMOS MÚLTIPLE DE FLUIDO (LP+TR) DE LARGA DURACIÓN.....	18
FIGURA 14. DOMO DE LAVA, CARACTERÍSTICAS Y PROCESO DE FORMACIÓN. A) ESQUEMA DE LA EXTRUSIÓN DOMO SOBRE EL CONDUCTO DE EMISIÓN DE UN VOLCÁN. B) FORMAS TÍPICAS DE LOS DOMOS DE LAVA. C) Y D) ESQUEMA DE LA DINÁMICA DE FLUJO DEL MAGMA-TAPÓN (PLUG) Y EL CONDUCTO VOLCÁNICO Y SISMICIDAD ASOCIADA.....	19

FIGURA 15. CRECIMIENTO DOMO DE LAVA EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ A FINALES DEL AÑO 2015. IMÁGENES DE RADAR COSMO-SKYMED DE LA AGENCIA ITALIANA ESPACIAL (ASI), MUESTRAN EL CRECIMIENTO DEL DOMO DE LAVA ENTRE SEPTIEMBRE 07 Y 23 DE 2015 (TOMADO Y MODIFICADO DE LUNDGREN ET AL. 2015). FOTOGRAFÍA DEL CRÁTER ARENAS REALIZADA EN SOBREVUELO DEL DÍA 19 DE NOVIEMBRE DE 2015 (PARTE INFERIOR IZQUIERDA).....	20
FIGURA 16. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO HB (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VNR DURANTE AÑO 2015. LOS CUADROS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS INSTALADAS EN EL ÁREA. EL CÍRCULO NARANJA SEÑALA EL SISMO TIPO HB DE MAYOR MAGNITUD REGISTRADO DURANTE EL AÑO.	21
FIGURA 17. REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTROGRAMA DEL SISMO TIPO LP DE MAYOR DESPLAZAMIENTO REDUCIDO REGISTRADO DURANTE EL AÑO 2015 EN EL VNR, OCURRIDO EL 15 DE MAYO A LAS 02:47 (HORA LOCAL), CON UN DR PROMEDIO DE 25.4 cm ² Y UNA DURACIÓN 35 S. COMPONENTE VERTICAL, ESTACIÓN OLLETA.....	22
FIGURA 18. MAPA DE LOCALIZACIÓN EPICENTRAL DE SISMOS TIPO LP (CÍRCULOS NARANJA) REGISTRADOS DURANTE EL AÑO 2015 EN EL VNR. LOS CUADROS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS.....	25
FIGURA 19. EJEMPLOS DE REGISTRO DE SISMOS LP EN EL VNR. A) SISMOS TIPO LP QUE OCURREN SEPARADAMENTE. B) SISMOS LP ANTECEDIENDO PULSOS DE TREMOR Y EPISODIOS DE TREMOR CONTINUO. C) SISMOS LP QUE FINALIZAN CICLOS DE LOS EPISODIOS DE TREMOR CONTINUO. LOS SISMOGRAMAS CORRESPONDEN 6 HORAS DE REGISTRO DE LA COMPONENTE Z DE OLLETA, LOS DÍAS 8 DE FEBRERO A PARTIR DE LAS 06:00 (HORA LOCAL), 14 DE ABRIL DESDE LAS 18:00 (HORA LOCAL) Y 23 DE MAYO A PARTIR DE LAS 00:00 (HORA LOCAL) RESPECTIVAMENTE.....	26
FIGURA 20. EJEMPLOS DE SISMOS MÚLTIPLES DE FLUIDOS EN EL VNR. A) SISMOS TIPO LP REGISTRADOS CONJUNTAMENTE CON TREMOR ESPASMÓDICO EN MEDIO DE TREMOR CONTINUO DE FONDO. B) SISMOS LP CON PULSOS DE TREMOR Y EPISODIOS DE TREMOR CONTINUO. LOS SISMOGRAMAS CORRESPONDEN 6 HORAS DE REGISTRO DE LA COMPONENTE Z DE OLLETA, LOS DÍAS 29 DE AGOSTO A PARTIR DE LAS 17:00 (HORA LOCAL) Y 14 DE SEPTIEMBRE DESDE LAS 07:00 (HORA LOCAL) RESPECTIVAMENTE.	27
FIGURA 21. FRECUENCIAS ASOCIADAS A LA MÁXIMA AMPLITUD DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO LP REGISTRADAS DURANTE EL AÑO 2015 EN EL VNR. A) FRECUENCIAS ENTRE 0.4 Y 16.6 HZ. B) DETALLE PARA FRECUENCIAS MENORES A 0.7 HZ.....	28
FIGURA 22. REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTRO DE UN SISMO TIPO VLP REGISTRADO EL 3 DE SEPTIEMBRE A LAS 10:45 (HORA LOCAL) EN EL VNR. ESTE EVENTO ES REGISTRADO CON UN LP, CON EL CUAL ANTECEDEN UN PULSO DE TREMOR. EL SISMOGRAMA CORRESPONDE A LA COMPONENTE VERTICAL, ESTACIÓN OLLETA, BANDA ANCHA.	29
FIGURA 23. QR DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ OBTENIDO MEDIANTE EL MÉTODO SOMPI, ENERO-DICIEMBRE DE 2015.	30
FIGURA 24. GRÁFICA DE DURACIÓN ENTRE LAS SEÑALES SÍSMICAS (LP + TR) DE LOS SISMOS MÚLTIPLES REGISTRADOS DURANTE EL PERIODO OCTUBRE-DICIEMBRE DE 2015 EN EL VNR.....	31
FIGURA 25. GRÁFICA DEL DESPLAZAMIENTO REDUCIDO DE LA SEÑAL DE MAYOR NIVEL ENERGÉTICO QUE CONSTITUYE LOS SISMOS MÚLTIPLES REGISTRADOS DURANTE LOS MESES DE OCTUBRE A DICIEMBRE DE 2015 EN EL VNR. MEDIDA TOMADA EN LA ESTACIÓN DE OLLETA, COMPONENTE VERTICAL.	31
FIGURA 26. VALORES DE FRECUENCIA Y DESPLAZAMIENTO REDUCIDO PARA EL TREMOR CONTINUO (CÍRCULOS AZULES) Y PULSOS DE TREMOR (CÍRCULOS AMARILLOS).....	32
FIGURA 27. EPISODIOS DESTACADOS DE TREMOR CONTINUO CON VARIACIONES EN SU AMPLITUD Y EN OCASIONES BANDEADO, CARACTERÍSTICO DE LA ACTIVIDAD DEL VNR ENTRE ENERO Y JUNIO DE 2015. GENERALMENTE ESTOS EPISODIOS DE TREMOR ESTUVIERON ASOCIADOS A EMISIONES DE CENIZA A LA ATMÓSFERA.....	33
FIGURA 28. EPISODIOS DESTACADOS DE TREMOR ESPASMÓDICO CARACTERÍSTICO DE LA ACTIVIDAD DEL VNR EN LOS MESES DE JULIO Y AGOSTO DE 2015. GENERALMENTE ESTOS EPISODIOS DE TREMOR ESTUVIERON ASOCIADOS A EMISIONES DE CENIZA A LA ATMÓSFERA.....	34
FIGURA 29. EPISODIOS DESTACADOS DE PULSOS DE TREMOR ANTECEDIDOS POR UNO O VARIOS SISMOS DE	

TIPO LP. GENERALMENTE ESTOS EPISODIOS DE TREMOR ESTUVIERON ASOCIADOS A EMISIONES DE CENIZA A LA ATMÓSFERA. ESTE TIPO DE EPISODIOS FUERON DENOMINADOS POSTERIORMENTE COMO EVENTOS MÚLTIPLES DE FLUIDOS.	35
FIGURA 30. PULSO DE TREMOR VOLCÁNICO DE MAYOR ENERGÍA REGISTRADO EN EL VNR. SISMOGRAMA Y ESPECTROGRAMA DE LA SEÑAL SÍSMICA REGISTRADA EL DÍA 31 DE AGOSTO A LAS 03:21 (HORA LOCAL) CON DRPROMEDIO: 35.2 CM ² . ESTACIÓN OLLETA, COMPONENTE VERTICAL.....	36
FIGURA 31. CAÍDA DE CENIZA ASOCIADA AL PULSO DE TREMOR VOLCÁNICO REGISTRADO EL DÍA 31 DE AGOSTO A LAS 03:21 (HORA LOCAL). SECTORES EN LA CIUDAD DE MANIZALES (RECUADRO IZQUIERDA). OTROS SECTORES DEL DEPARTAMENTO DE CALDAS (RECUADRO DERECHA).	36
FIGURA 32. GRÁFICA DE LA MEDIDA DE LA AMPLITUD SÍSMICA EN TIEMPO REAL - RSAM (POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) PARA HACER SEGUIMIENTO AL REGISTRO DEL TREMOR VOLCÁNICO CONTINUO EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ DURANTE EL 2015.....	37
FIGURA 33. SSAM (MEDIDA DE LA AMPLITUD SÍSMICA ESPECTRAL), DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2015. ESTACIÓN DE BIS, COMPONENTE VERTICAL.....	38
FIGURA 34. SSAM (MEDIDA DE LA AMPLITUD SÍSMICA ESPECTRAL), DURANTE EL SEGUNDO SEMESTRE DE 2015. ESTACIÓN DE BIS, COMPONENTE VERTICAL.....	38
FIGURA 35. ALTURA DE COLUMNA DE GASES Y CENIZA OBSERVADA ENTRE ENERO-DICIEMBRE DE 2014 A PARTIR DE APRECIACIONES VISUALES DESDE EL OVSM Y DE LAS CÁMARAS INSTALADAS EN EL ÁREA DEL VOLCÁN.	39
FIGURA 36. COLUMNA DE GASES DEL CRÁTER ARENAS, VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. FOTOGRAFÍAS CAPTURADAS DURANTE EL AÑO DE 2015, DESDE LAS CÁMARAS UBICADAS EN INMEDIACIONES DE LA ESTRUCTURA VOLCÁNICA DEL VNR -SECTOR DE PIRAÑA - AZUFRADO Y SECTOR DEL CERRO GUALÍ Y DESDE LAS INSTALACIONES DEL OVSM.	40
FIGURA 37. IMÁGENES ASTER DEL SENSOR OLI-TIRS, ACOPLADO AL SATÉLITE LANDSAT8, CAPTADAS EN DIFERENTES DÍAS DEL AÑO 2015.	41
FIGURA 38. ANOMALÍAS TÉRMICAS REGISTRADAS POR EL PROYECTO MIROVA, EN EL VNR DESDE ENERO HASTA DICIEMBRE DE 2015.	42
FIGURA 39. RED DE DEFORMACIÓN. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.	43
FIGURA 40. SERIES DE TIEMPO COMPONENTE NORTE DE LAS ESTACIONES GPS GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI Y SINN DEL VNR OBTENIDAS CON EL SOFTWARE GAMIT-GLOBK.....	44
FIGURA 41. SERIES DE TIEMPO COMPONENTE ESTE DE LAS ESTACIONES GPS GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI Y SINN DEL VNR OBTENIDAS CON EL SOFTWARE GAMIT-GLOBK.....	44
FIGURA 42. SERIES DE TIEMPO COMPONENTE VERTICAL DE LAS ESTACIONES GPS GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI Y SINN DEL VNR OBTENIDAS CON EL SOFTWARE GAMIT-GLOBK.....	45
FIGURA 43. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE (N) (AZUL) Y ESTE (E) (ROJO) DE LOS INCLINÓMETROS ELECTRÓNICOS AZUF, BIS, GUAL, LISA, MOLI, NERE, RECI Y REFU DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ DESDE ENERO DE 2012 HASTA DICIEMBRE DE 2015.....	46
FIGURA 44. INTERFEROGRAMA ASOCIADO CON LA DEFORMACIÓN PRESENTADA EN EL SECTOR DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ ENTRE SEPTIEMBRE DE 2014 Y AGOSTO DE 2015. CORTESÍA LOS DRS. SERGEY SANSONOV Y PAUL LUNDGREN DEL CANADÁ CENTRE FOR MAPPING AND EARTH OBSERVATION NATURAL RESOURCES Y DEL JET PROPULSION LABORATORY (NASA).	46
FIGURA 45. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE (AZUL) Y ESTE (ROJO) DE LOS INCLINÓMETROS ELECTRÓNICOS BIS (A), NERE (B), RECI (C) Y REFU (D) DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ DURANTE 2015.	47
FIGURA 46. COMPORTAMIENTO DE LA BASE EDM REFUGIO Y LOS REFLECTORES R-1, R-2, R-3, R-4, R-5, R-6 Y OLLETA, DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VNR HASTA DICIEMBRE DE 2015.	48
FIGURA 47. RED GEOQUÍMICA. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.	49
FIGURA 48. FOTOGRAFÍAS DE LA CONSTANTE EMISIÓN DE CENIZA DEL VNR QUE AFECTÓ EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO SCAN DOAS Y LA TELEMETRÍA DE LA ESTACIÓN BRUMA (JUNIO DE 2015).	50
FIGURA 49. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES SCAN DOAS QUE OPERARON EN EL 2015. VOLCÁN	

	50
NEVADO DEL RUIZ.....	50
FIGURA 50. FLUJOS MÁXIMOS DE SO ₂ ESTIMADOS EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ ENTRE LOS AÑOS 2010-2015.	52
FIGURA 51. FLUJOS DE SO ₂ : PROMEDIO Y MÁXIMO ESTIMADO DESDE ESTACIONES SCAN DOAS. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	53
FIGURA 52. DESCARGA DE SO ₂ ACUMULADA A 2012-2015. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.	54
FIGURA 53. DESCARGA DE SO ₂ EMITIDA A LA ATMÓSFERA 2010 A 2015. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.	55
FIGURA 54. FRECUENCIA DE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO PREDOMINANTES PARA EL AÑO 2015.	56
FIGURA 55. IMÁGENES OMI QUE MUESTRAN LA DEGASIFICACIÓN SO ₂ EN EL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	57
FIGURA 56. FLUJOS DE SO ₂ ESTIMADOS CON EQUIPO MOBILEDOAS. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	58
FIGURA 57. RUTAS FRECUENTES PARA MEDIDA DE SO ₂ CON EQUIPO MOBILEDOAS. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ 2015.	59
FIGURA 58. VARIACIÓN DE LOS NIVELES DE RADÓN EN SUELO ESTACIONES GUALI, OLLETA, AZUFRADO Y ALFOMBRALES. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ 2015.	60
FIGURA 59. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUENTES TERMALES: HOTEL, AGUAS CALIENTES, NEREIDAS Y BOTERO LONDOÑO VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ 2015.	61
FIGURA 60. VARIACIÓN DEL PH EN FUENTES TERMALES HOTEL Y AGUAS CALIENTES. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	62
FIGURA 61. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN FUENTES TERMALES HOTEL, AGUAS CALIENTES, NEREIDAS Y BOTERO LONDOÑO. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	63
FIGURA 62. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS Y CLORUROS EN LAS FUENTES TERMALES HOTEL Y AGUAS CALIENTES. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	64
FIGURA 63. ESTACIÓN NIDO DE AGUILA.	66
FIGURA 64. RED SISMOLÓGICA. VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA.	67
FIGURA 65. NÚMERO DE SISMOS DIARIOS OCURRIDOS EN EL VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA DURANTE EL AÑO 2015.	67
FIGURA 66. RAÍZ DE LA ENERGÍA DIARIA LIBERADA EN EL VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA DURANTE EL AÑO 2015.	68
FIGURA 67. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS VOLCANO-TECTÓNICOS (CÍRCULOS DE COLORES), REGISTRADOS EN EL VNT DURANTE EL AÑO 2015. LOS CUADROS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS.	68
FIGURA 68. RED DE DEFORMACIÓN. VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA.	69
FIGURA 69. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE Y ESTE DE LOS INCLINÓMETROS ELECTRÓNICOS ESME (A) Y LMAR (B), DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VNT DURANTE 2015.	70
FIGURA 70. ESTACIÓN SISMOLOGICA SAN LORENZO Y SILENCIO. VOLCAN CERRO MACHIN.	71
FIGURA 71. NUEVAS ESTACIÓN DE GAS RADÓN. VOLCÁN CERRO MACHIN.	72
FIGURA 72. RED SISMOLÓGICA. VOLCÁN CERRO MACHÍN.	73
FIGURA 73. NÚMERO DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT DIARIOS, OCURRIDOS DURANTE EL AÑO 2015 EN EL VCM.	73
FIGURA 74. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA DIARIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT, REGISTRADOS DURANTE EL AÑO 2015 EN EL VCM.	74
FIGURA 75. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS VOLCANO-TECTÓNICOS (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VCM, DURANTE EL AÑO 2015. LOS CUADROS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS.	74
FIGURA 76. REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTROGRAMA ASOCIADO A LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT DE MAYOR ENERGÍA REGISTRADOS DURANTE EL MES DE DICIEMBRE EN EL VCM, OCURRIDO EL DÍA 22 DE DICIEMBRE A LAS 06:09 (HORA LOCAL). ESTACIÓN CIMA, COMPONENTE VERTICAL.	75
FIGURA 77. REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTROGRAMA ASOCIADO AL EVENTO SÍSMICO TIPO VT DE MAYOR ENERGÍA REGISTRADO DURANTE EL MES DE DICIEMBRE EN EL VCM, OCURRIDO EL DÍA 22 DE DICIEMBRE A LAS 06:22 (HORA LOCAL). ESTACIÓN CIMA, COMPONENTE VERTICAL.	75

FIGURA 78. SISMOGRAMA ESTACIÓN CIMA, COMPONENTE VERTICAL EL 22 DE DICIEMBRE ENTRE LAS 05:00 Y LAS 07:00 (HORA LOCAL). SE OBSERVAN LOS SISMOS REGISTRADOS DURANTE EL INCREMENTO. LOS SISMOS DESTACADOS CON ESTRELLAS DE COLOR AMARILLO CORRESPONDEN CON LOS DE MAYOR MAGNITUD REGISTRADOS DURANTE EL INCREMENTO, AMBOS CON UNA MAGNITUD 3.0 M _L (MAGNITUD LOCAL).	75
FIGURA 79. VARIACIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO EN EL VOLCÁN CERRO MACHÍN, ENERO-DICIEMBRE DE 2015, ESTACIÓN DOMO.	76
FIGURA 80. VARIACIONES DEL CAMPO MAGNÉTICO EN EL VOLCÁN CERRO MACHÍN, ENERO-NOVIEMBRE DE 2015, ESTACIÓN AGUAS CALIENTES.	77
FIGURA 81. RED DE DEFORMACIÓN. VOLCÁN CERRO MACHÍN.	78
FIGURA 82. SERIES DE TIEMPO COMPONENTE NORTE DE LAS ESTACIONES GPS LAGU, MRAL, RODE, SANA Y SECR DEL VCM OBTENIDAS CON EL SOFTWARE GAMIT-GLOBK.	78
FIGURA 83. SERIES DE TIEMPO COMPONENTE ESTE DE LAS ESTACIONES GPS LAGU, MRAL, RODE, SANA Y SECR DEL VCM OBTENIDAS CON EL SOFTWARE GAMIT-GLOBK.	79
FIGURA 84. SERIES DE TIEMPO COMPONENTE VERTICAL DE LAS ESTACIONES GPS LAGU, MRAL, RODE, SANA Y SECR DEL VCM OBTENIDAS CON EL SOFTWARE GAMIT-GLOBK.	79
FIGURA 85. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE (AZUL), ESTE (ROJO) Y RESULTANTE (MAGENTA) DEL INCLINÓMETRO ELECTRÓNICO CIMA, DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VCM HASTA DICIEMBRE DE 2015.	80
FIGURA 86. RED GEOQUÍMICA. VOLCÁN CERRO MACHÍN.	81
FIGURA 87. COMPORTAMIENTO DE LAS ESTACIONES DE GAS RADÓN ALEJANDRIA Y LAGUNA. VOLCÁN CERRO MACHÍN. 2015.	82
FIGURA 88. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN FUENTES TERMALES: PISCINA Y ESTATUAS. VOLCÁN CERRO MACHÍN 2015.	83
FIGURA 89. VARIACIÓN DEL PH EN FUENTES TERMALES: PISCINA Y ESTATUAS. VOLCÁN CERRO MACHÍN. 2015.	84
FIGURA 90. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA FUENTES TERMALES PISCINA Y ESTATUAS. VOLCÁN CERRO MACHÍN. 2015.	84
FIGURA 91. MONITOREO TELEMÉTRICO DE LA TEMPERATURA EN LA FUENTE TERMAL ESTATUAS. VOLCÁN CERRO MACHÍN 2015.	85
FIGURA 92. INSTALACIÓN DE REPETIDOR CERRO BRAVO.	86
FIGURA 93. DIGITALIZACIÓN ESTACIÓN DE CORTO PERIODO CAJONES.	87
FIGURA 94. RED SISMOLÓGICA. VOLCÁN CERRO BRAVO.	88
FIGURA 95. NÚMERO DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO LP DIARIOS, OCURRIDOS DURANTE EL 2015 EN EL VOLCÁN CERRO BRAVO.	88
FIGURA 96. REGISTRO SÍSMICO Y ESPECTROGRAMA ASOCIADO AL SISMO DE TIPO LP DE MAYOR ENERGÍA DEL 2015 EN EL VCB, REGISTRADO EL DÍA 01 DE AGOSTO A LAS 10:59 (HORA LOCAL), DURACIÓN 52 S. COMPONENTE VERTICAL, ESTACIÓN BRASIL, FORMA DE ONDA DE LA SEÑAL SÍSMICA (ARRIBA) Y ESPECTROGRAMA DEL SISMO LP (ABAJO).	89
FIGURA 97. RED DE DEFORMACIÓN DEL VOLCÁN CERRO BRAVO.	90
FIGURA 98. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE (AZUL) Y ESTE (ROJO) DEL INCLINÓMETRO ELECTRÓNICO CBRA, DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VOLCÁN CERRO BRAVO DURANTE 2015.	90
FIGURA 99. RED SISMOLÓGICA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA.	92
FIGURA 100. NÚMERO DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT DIARIOS, OCURRIDOS DURANTE EL AÑO 2015 EN EL VPSR.	93
FIGURA 101. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA DIARIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT REGISTRADOS DURANTE EL AÑO 2015, EN EL VPSR.	93
FIGURA 102. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS VOLCANO-TECTÓNICOS (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VPSR, DURANTE EL AÑO 2015. LOS CUADRADOS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS.	94
FIGURA 103. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SAN VICENTE. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA. 2015.	95

FIGURA 104. VARIACIÓN DEL PH EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SAN VICENTE. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA. 2015.	96
FIGURA 105. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SAN VICENTE. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA 2015.....	96
FIGURA 106. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SANTA ELENA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA 2015.	97
FIGURA 107. VARIACIÓN DEL PH EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SANTA ELENA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA. 2015.	98
FIGURA 108. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SANTA ELENA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA 2015.	98
FIGURA 109. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SANTA ROSA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA. 2015.	99
FIGURA 110. VARIACIÓN DEL PH EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SANTA ROSA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA 2015.	100
FIGURA 111. VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN MANANTIALES TERMALES BALNEARIO SANTA ROSA. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA 2015.....	100
FIGURA 112. INSTALACIÓN ESTACIÓN SISMOLOGICA LAGUNA VERDE. VOLCAN NEVADO DE SANTA ISABEL.	101
FIGURA 113. INSTALACIÓN ESTACIÓN SÍSMICA AFRICA. VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL.....	101
FIGURA 114. INSTALACIÓN ESTACIÓN GPS OTUN. VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL.....	102
FIGURA 115. RED SISMOLÓGICA. VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL.....	103
FIGURA 116. NÚMERO DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT DIARIOS, OCURRIDOS DURANTE EL 2015 EN EL VNSI.	103
FIGURA 117. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA DIARIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT REGISTRADOS DURANTE EL 2015, EN EL VNSI.	104
FIGURA 118. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS VOLCANO-TECTÓNICOS (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VNSI Y EL SECTOR DE CERRO ESPAÑA, DURANTE EL 2015. LOS CUADRADOS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS.	104
FIGURA 119. NÚMERO DIARIO DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT OCURRIDOS DURANTE EL 2015 EN EL CERRO ESPAÑA.....	105
FIGURA 120. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA DIARIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT REGISTRADOS DURANTE EL 2015, EN EL CERRO ESPAÑA.	105
FIGURA 121. RED DE DEFORMACIÓN. VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL.....	106
FIGURA 122. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE (AZUL) Y ESTE (ROJO) DEL INCLINÓMETRO ELECTRÓNICO CHAV DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VNSI HASTA DICIEMBRE DE 2015.	107
FIGURA 123. COMPORTAMIENTO DE LAS COMPONENTES NORTE (AZUL) Y ESTE (ROJO) DEL INCLINÓMETRO ELECTRÓNICO GLAC, DE LA RED DE DEFORMACIÓN DEL VNSI HASTA DICIEMBRE DE 2015.	107
FIGURA 124. NÚMERO DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT DIARIOS REGISTRADOS EN EL VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE DURANTE EL 2015.	108
FIGURA 125. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA DIARIA LIBERADA POR EVENTOS TIPO VT EN EL VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE DURANTE EL 2015.	109
FIGURA 126. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE DURANTE EL AÑO 2015. LOS CUADRADOS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS INSTALADAS EN EL ÁREA. LÍNEAS ROJAS CORRESPONDEN A LOS RASGOS ESTRUCTURALES MÁS RELEVANTES.	109
FIGURA 127. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS VOLCANO-TECTÓNICOS (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VPC, DURANTE EL MES DE ABRIL DE 2015 Y SISMOGRAMA ASOCIADO CON EL INCREMENTO EN LA ACTIVIDAD DURANTE EL 13 DE ABRIL.	110
FIGURA 128. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS HÍBRIDOS (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN LA ESTRUCTURA VOLCÁNICA DEL VPC, DURANTE EL MES DE OCTUBRE DE 2015 (IZQUIERDA). FORMAS DE ONDA Y ESPECTROGRAMAS DE LOS SISMOS HÍBRIDOS REGISTRADOS EL DÍA 11 DE OCTUBRE DE 2015 (DERECHA).	111

FIGURA 129. NÚMERO DE EVENTOS SÍSMICOS DIARIOS TIPO VT, OCURRIDOS DURANTE EL 2015 EN EL VPQ.	112
FIGURA 130. RAÍZ DE LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA DIARIA DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT REGISTRADOS DURANTE EL 2015 EN EL VPQ.	113
FIGURA 131. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE LOS SISMOS VOLCANO-TECTÓNICOS (CÍRCULOS DE COLORES) REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VPQ, DURANTE EL 2015. LOS CUADRADOS NEGROS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS.....	113
FIGURA 132. INSTALACIÓN DE ESTACIÓN PORTÁTIL EL HOYO. VOLCAN EL ESCONDIDO	115
FIGURA 133. MANANTIAL TERMAL SANTA MARTA. VOLCÁN EL ESCONDIDO. 2015	116
FIGURA 134. MANANTIAL TERMAL ESPÍRITU SANTO. VOLCÁN EL ESCONDIDO.2015	117
FIGURA 135. MANANTIAL TERMAL SAN ANTONIO. VOLCÁN EL ESCONDIDO 2015.....	118
FIGURA 136. DIGITALIZACIÓN ESTACIÓN SÍSMICA DE SAN JULIAN.	119
FIGURA 137. MAPA DE LOCALIZACIÓN HIPOCENTRAL DE SISMOS TECTÓNICOS LOCALES EN LA REGIÓN CENTRAL DE COLOMBIA, AÑO 2015.	120

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LISTADO DE LOS EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT DESTACADOS DURANTE EL AÑO 2015.	10
TABLA 2. PRINCIPALES INCREMENTOS SÍSMICOS EN LA ACTIVIDAD TIPO VT EN EL ÁREA DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ DURANTE EL 2015.	12
TABLA 3. PRINCIPALES EVENTOS SÍSMICOS TIPO VT EN CUANTO A ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA, REGISTRADOS EN EL ÁREA DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ DURANTE EL 2015.	15
TABLA 4. EPISODIOS SÍSMICOS TIPO “DRUMBEATS” REGISTRADOS EN EL VNR DURANTE EL AÑO 2015.	16
TABLA 5. PRINCIPALES EVENTOS TIPO LP DE CADA MES DEL AÑO 2015, REGISTRADOS EN EL VNR. LOS CUADRADOS REPRESENTAN LAS ESTACIONES SISMOLÓGICAS, Y LA CRUZ ROJA EL EPICENTRO DEL SISMO.	22
TABLA 6. FLUJOS DE SO ₂ ESTIMADOS DE LAS ESTACIONES SCAN DOAS. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ.	51
TABLA 7. PARÁMETROS DE VIENTO Y RUTAS USADAS PARA MEDIDAS MÓVILES DE SO ₂ . VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	58
TABLA 8 DATOS DE GASES EN LA FUMAROLA NEREIDAS (PORCENTAJE MOLAR EN BASE SECA). VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ. 2015.	65
TABLA 9. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS FT PUENTE TIERRA, TOCHE Y LAS DELICIAS. VOLCÁN CERRO MACHÍN.	85
TABLA 10. FISICOQUÍMICA DEL AGUA DEL MANANTIAL TERMAL SANTA MARTA. VOLCÁN EL ESCONDIDO. .	116
TABLA 11. FISICOQUÍMICA DEL AGUA DEL MANANTIAL TERMAL ESPÍRITU SANTO. VOLCÁN EL ESCONDIDO.	117
TABLA 12. FISICOQUÍMICA DEL AGUA DEL MANANTIAL TERMAL SAN ANTONIO. VOLCÁN EL ESCONDIDO. ...	118

INTRODUCCIÓN

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), a través de la dirección de Geoamenazas, ha implementado una red de Observatorios Vulcanológicos y Sismológicos en el costado centro-occidental del territorio colombiano, con el fin de monitorear los volcanes activos de esta sección del país. El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales (SGC-OVSM), creado en 1986, se encarga de realizar monitoreo continuo de los volcanes pertenecientes al Segmento Norte de Colombia. Se monitorea permanentemente los volcanes San Diego, Romeral, Cerro Bravo, Volcán Nevado del Ruiz, Volcán Paramillo del Cisne, Volcán Nevado de Santa Isabel, Volcán Paramillo de Santa Rosa, Volcán Paramillo del Quindío, Volcán Nevado del Tolima y Volcán Cerro Machín, así como los demás centros volcánicos situados dentro del complejo volcánico. Estos volcanes se encuentran localizados en los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y Tolima.

Cumpliendo con la misión que le ha sido encomendada, el SGC-OVSM realiza monitoreo continuo del comportamiento que presentan los volcanes anteriormente mencionados, prestando especial atención a la actividad registrada por el Volcán Nevado del Ruiz, Nevado de Santa Isabel y el Volcán Cerro Machín, los cuales han venido mostrando variaciones en su comportamiento con diferentes fluctuaciones en cuanto a la liberación de energía sísmica y demás parámetros geofísicos, geodésicos y geoquímicos que se tienen en cuenta para valorar la actividad volcánica.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC-OVSM) presenta el informe de actividad de los volcanes del Segmento Norte de Colombia, correspondiente al año 2015. Este informe compila la información obtenida a través de las redes de vigilancia instaladas en los alrededores de los centros volcánicos (Figura 1).

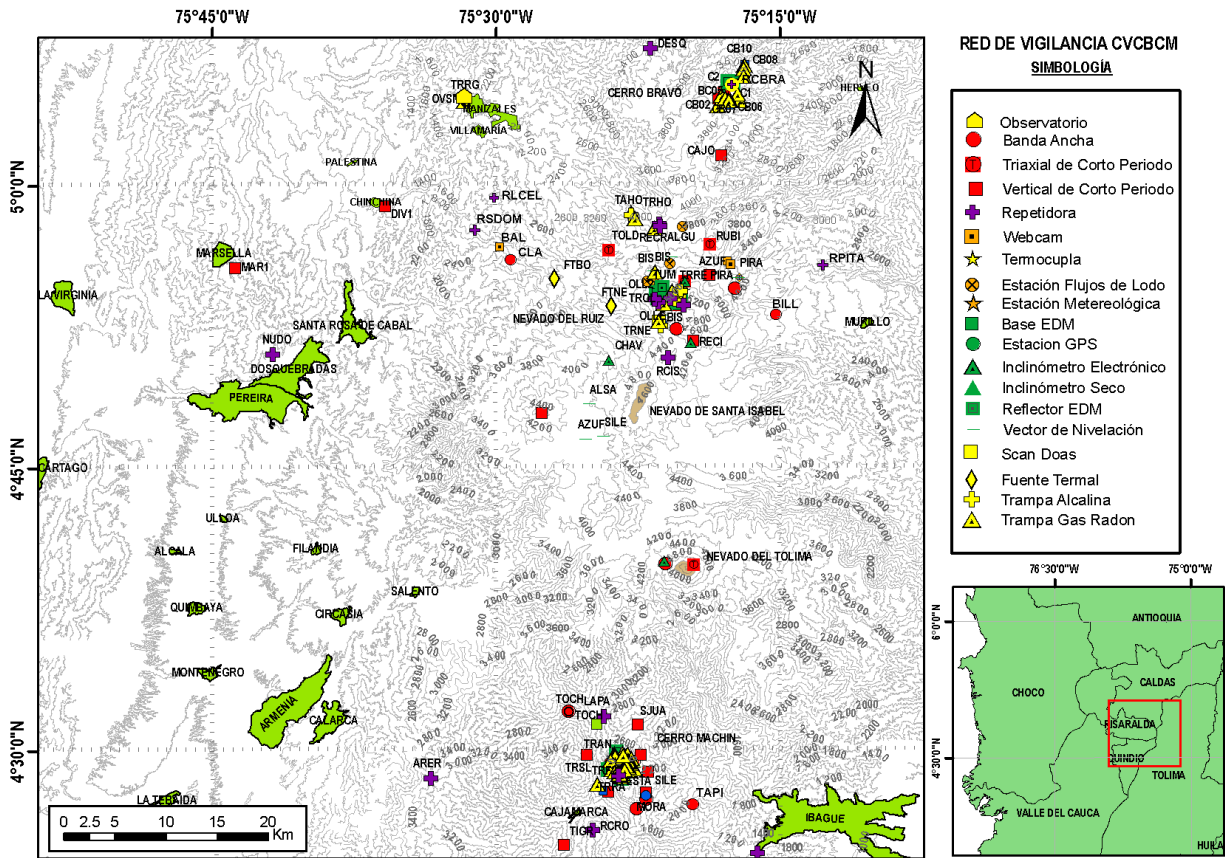


Figura 1. Red de vigilancia Complejo Volcánico Norte de Colombia.

1. VOLCÁN NEVADO DEL RUIZ (VNR)

1.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán en el año 2015 fue del **90.3%**. Durante este año se destaca la instalación de dos cámaras Web para monitoreo de Flujos de Lodo en las estaciones de GUALI3 y LAGUNILLAS y la digitalización de las estaciones analógicas multiparamétrica de LISA y corto periodo INDERENA y TOLDA FRIA (Figura 2).



Figura 2. Digitalización de estación multiparamétrica de LISA.

Por otra parte se construyó una caseta en el repetidor el CAMION, para la protección de los equipos y la ampliación de nuevas redes telemétricas digitales. En el repetidor PITAYO se instalaron los equipos del sistema de comunicación digital, sistemas de suministro de energía solar y protecciones eléctricas (Figura 3).



Figura 3. Caseta repetidor PITAYO.

Adicionalmente, se realizaron mejoras en algunas de las estaciones del VNR en los sistemas de protección de equipos por descargas eléctricas atmosféricas y de aislamiento térmico de los sensores en las estaciones de monitoreo volcánico.

También, se mejoraron los sistemas de suministro de energía eléctrica solar en varias estaciones, como la instalación de un banco de baterías robusto en la estación multiparamétrica OLLETA2 (Figura 4) para obtener una autonomía mayor de funcionamiento de los equipos de aproximadamente tres meses por caída de ceniza en los paneles solares sin que la estación se apague.



Figura 4. Instalación banco baterías estación multiparamétrica OLLETA2.

Además, se reemplazaron muchas estructuras de paneles solares por unas más robustas y con soporte para inclinaciones graduables con el fin de mitigar el efecto de la ceniza que se acumula durante una emisión y se reemplazaron algunos gabinetes metálicos de hierro por otros de fibra de vidrio.

Asimismo se ha rediseñado la topología de la red telemétrica en el VNR de los enlaces telemétricos de radio digital en algunas de las estaciones, con el objetivo de mejorar la Latencia que es un retardo producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red de las estaciones Vulcanológicas.

1.2 SISMOLOGÍA

Durante el año de 2015, la red de estaciones sismológicas instaladas en el Volcán Nevado del Ruiz (VNR) (Figura 5) registró, en un porcentaje mayor que el año anterior, actividad sísmica principalmente relacionada con la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos como episodios de temblor volcánico continuo, pulsos de temblor volcánico y sismos de largo periodo (Figura 6a). La sismicidad asociada con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica también se registró, pero en una proporción menor al año 2014 (Figura 6 y Figura 7).

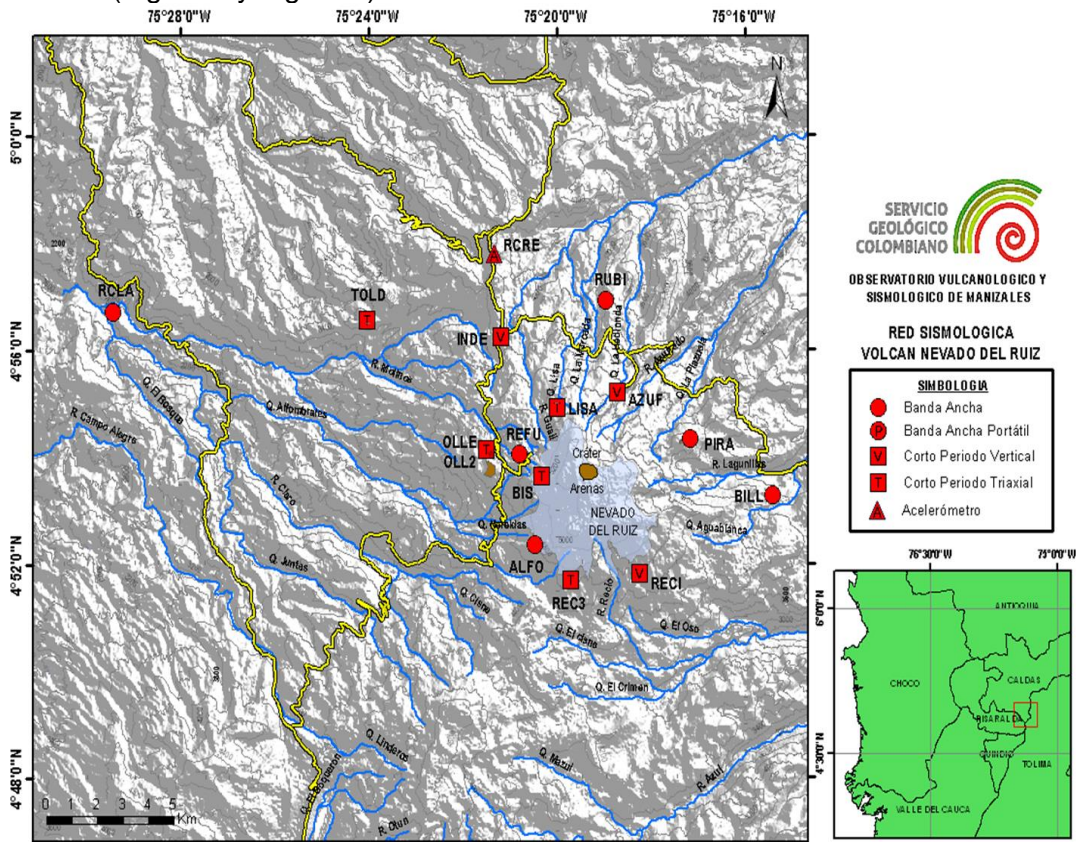
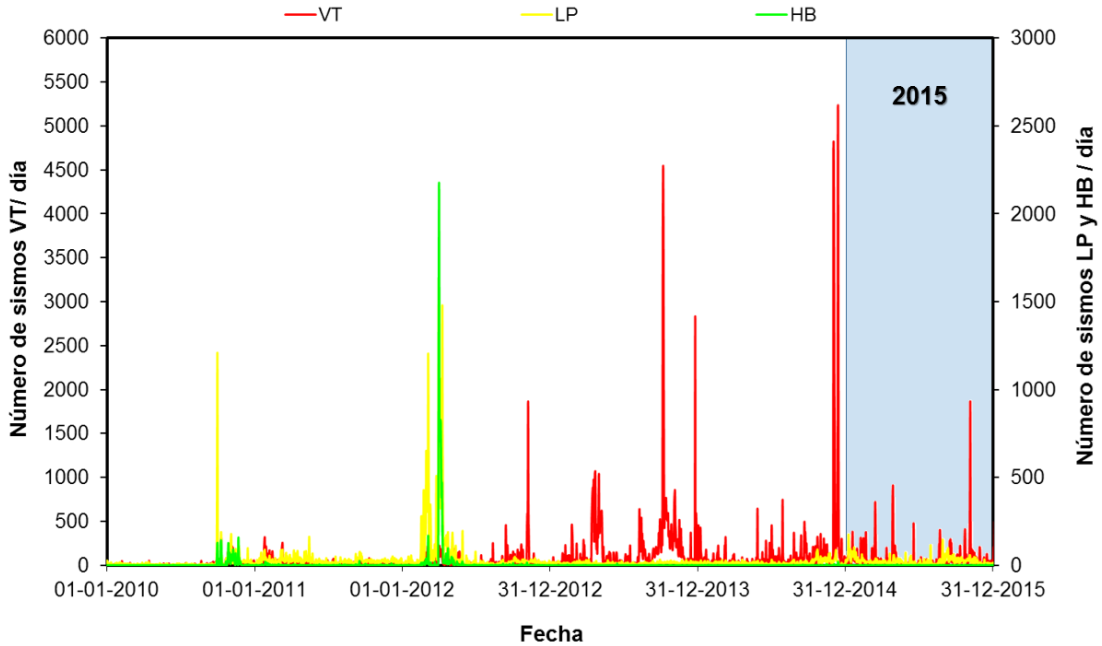


Figura 5. Red Sismológica. Volcán Nevado del Ruiz.

a)



b)

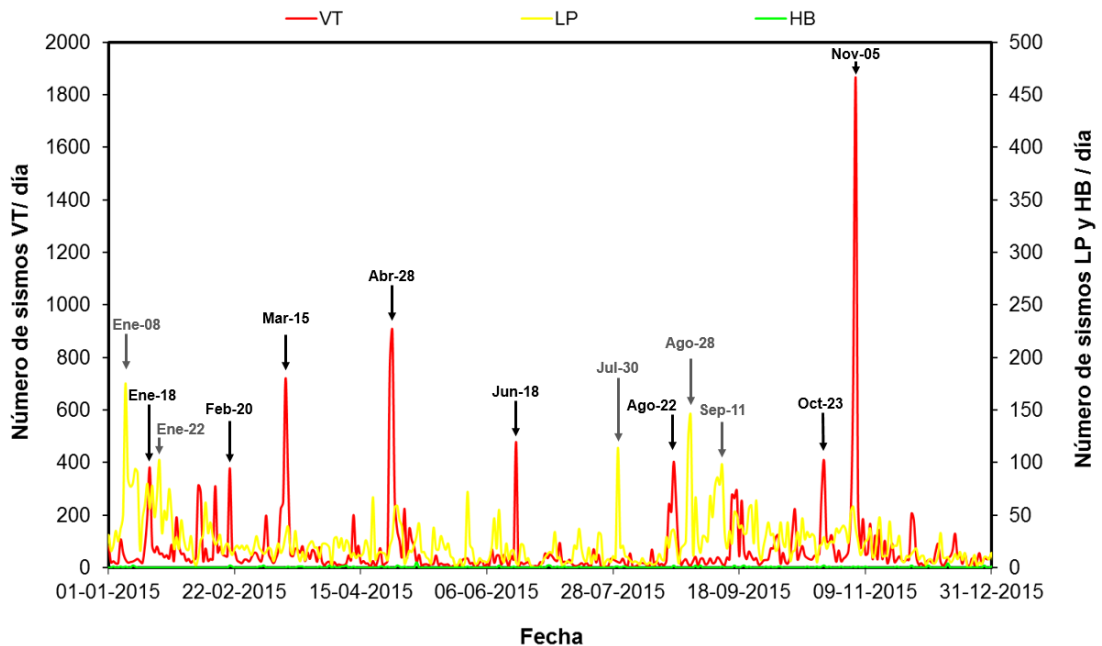
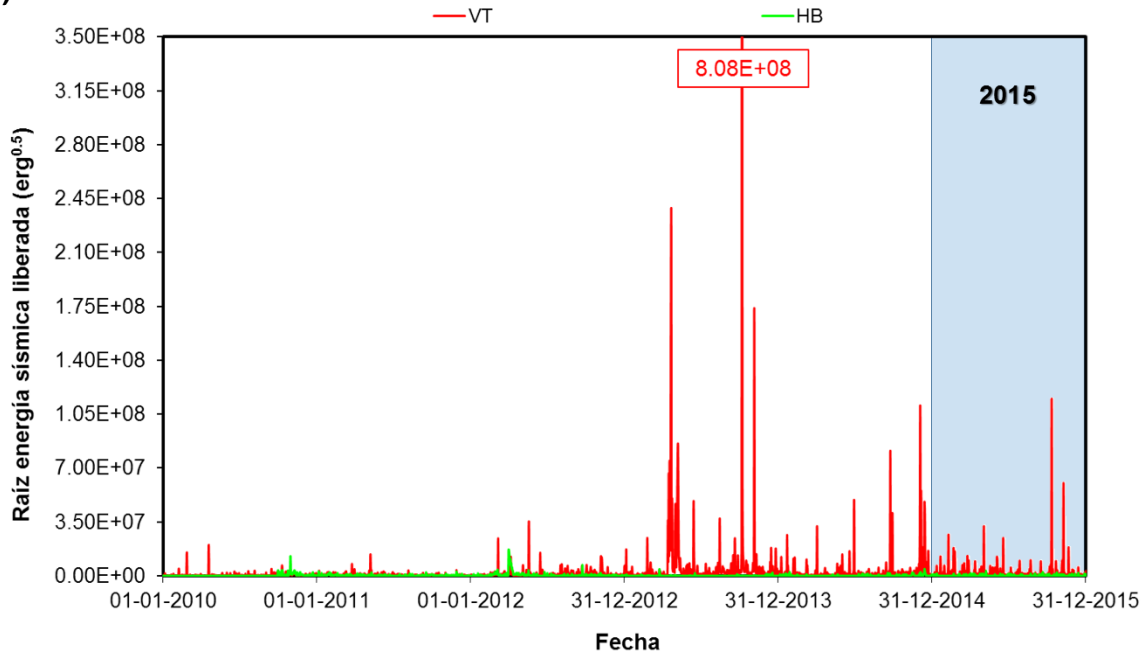


Figura 6. Número de sismos diarios tipo VT, HB y LP registrados en el Volcán Nevado del Ruiz, a) Periodo 2010 – 2015 y, b) Periodo 2015.

a)



b)

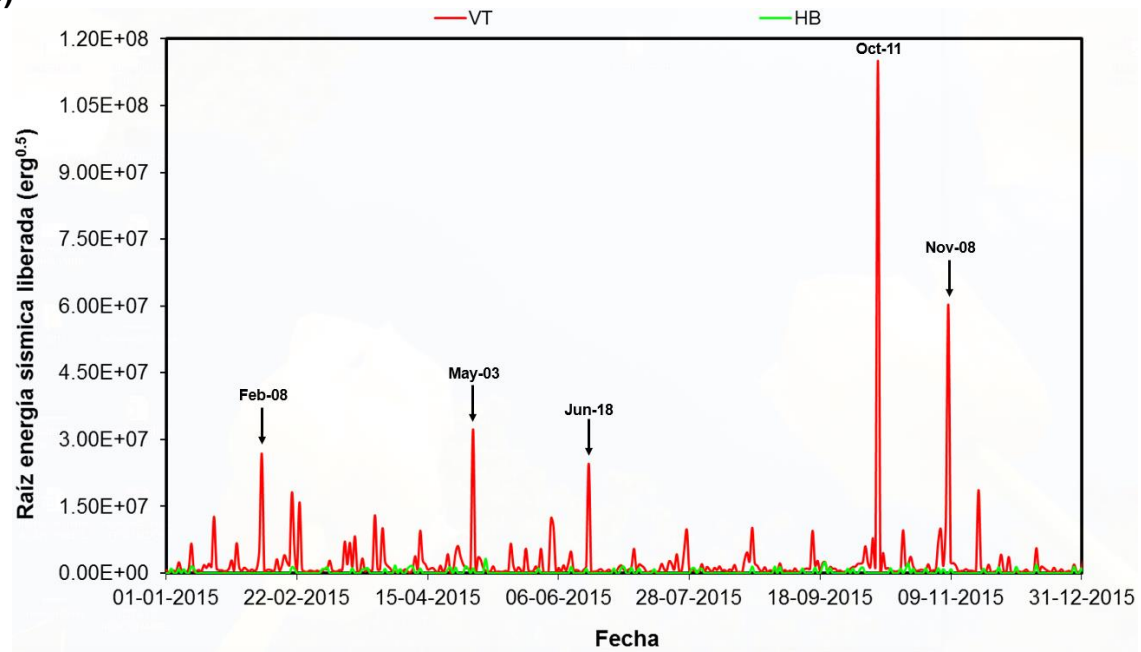


Figura 7. Raíz de la energía sísmica diaria liberada por eventos tipo VT y HB en el Volcán Nevado del Ruiz. a) Periodo 2010 – 2015 y, b) Periodo 2015.

1.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

La actividad de tipo VT asociada al fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica en el VNR, mostró durante el 2015, aunque en menor proporción que el año anterior, importantes niveles de sismicidad tanto en la energía sísmica liberada como en el número de sismos registrados, evidenciándose así que en el VNR continua el proceso de incremento en la actividad sísmica iniciado desde finales de 2010.

Esta actividad (VT) estuvo localizada en los sectores Nororiente y Cráter Arenas, Sur-Suroccidente, Occidente-Suroccidente, Noroccidente, Norte-Noroccidente distal y Suroriente (Figura 9). A profundidades que oscilaron entre 0.1 (en proximidades del cráter) y 10.5 km (en sectores distales del edificio volcánico, sector Norte-Noroccidente distal), con un predominio de eventos tipo VT a profundidades entre 3.0 y 4.0 km. Las magnitudes locales (M_L) estimadas fluctuaron entre -0.5 y 3.3 M_L , registrándose 23 eventos con magnitud local mayor o igual a $\geq 2.0 M_L$, siendo algunos de éstos reportados como sentidos por los habitantes en el área de influencia del volcán. El sismo de mayor magnitud local registrado en el año ocurrió el día 11 de Octubre de 2015 a las 08:02 (hora local), a 3.6 km de profundidad, en el sector Nororiente del edificio volcánico durante un incremento sísmico menor (Figura 8 y Tabla 1). En la Tabla 1, se enumeran los eventos sísmicos tipo VT destacados durante el año 2015. Para cada mes se describe el sismo tipo VT de mayor magnitud estimada, indicando si el evento fue reportado como sentido y estuvo asociado a un incremento en la actividad sísmica del VNR.

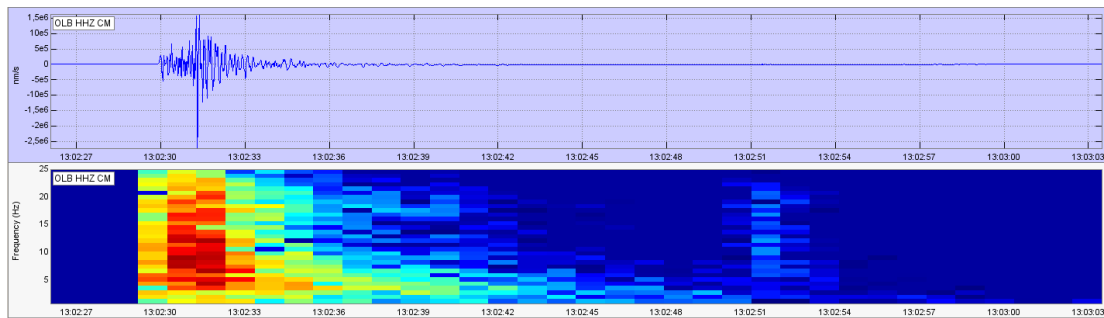


Figura 8. Registro sísmico y espectrograma asociado al evento sísmico tipo VT de mayor energía registrado en el VNR durante el año 2015. Sismo ocurrido el día 11 de Octubre a las 08:02 (hora local). Estación OLLETA, componente vertical.

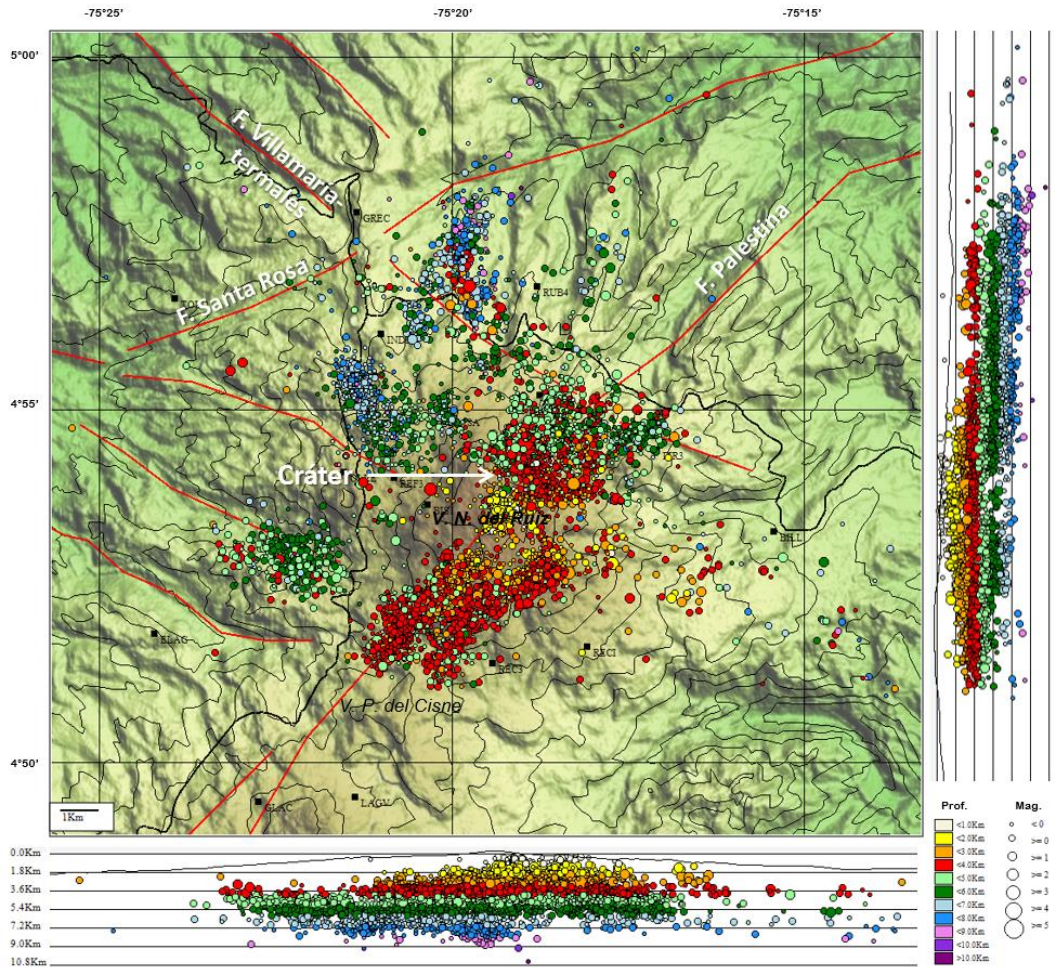


Figura 9. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo VT (círculos de colores) registrados en el área del VNR durante año 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas instaladas en el área.

Tabla 1. Listado de los eventos sísmicos tipo VT destacados durante el año 2015.

Mes	Fecha y hora local	Magnitud (M _L)	Profundidad (km)	Fuente sismogénica*	Sismo Sentido	Observaciones**
Enero	20/01/2015 06:40	2.2 M _L	2.39	Nororiente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
Febrero	08/02/2015 00:05	2.7 M _L	4.44	Nororiente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente y Noroccidente con respecto al Cráter.
Marzo	28/03/2015 11:59	2.2 M _L	3.08	Noroccidente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
Abril	12/04/2015 13:30	1.9 M _L	3.73	Nororiente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente con respecto al Cráter.
Mayo	03/05/2015 07:29	2.8 M _L	2.4	Suroccidente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Suroccidente con respecto al Cráter.
Junio	18/06/2015 06:30	2.6 M _L	3.33	Nororiente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente con respecto al Cráter.
Julio	27/07/2015 02:08	2.2 M _L	3.76	Nororiente	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.
Agosto	22/08/2015 20:59	2.0 M _L	2.0	Nororiente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente con respecto al Cráter.
Septiembre	20/09/2015 14:36	2.0 M _L	3.30	Norte distal	NO	Híbrido Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente con respecto al Cráter.
	15/09/2015 15:41	1.9 M _L	3.05	Nororiente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Norte distal con respecto al Cráter.
Octubre	11/10/2015 08:02	3.3 M _L	3.60	Nororiente	SI	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente con respecto al Cráter. Este evento fue reportado como sentido por habitantes en el área de influencia del volcán
Noviembre	08/11/2015 22:48	3.1 M _L	1.7	Nororiente	NO	Asociado a un incremento menor registrado en el sector Nororiente con respecto al Cráter.
Diciembre	02/12/2015 00:50	1.7 M _L	2.22	Sur	NO	Evento aislado, no asociado a un incremento.

*Las fuentes o sectores sismogénicas son mencionadas con referencia al Cráter Arenas.
 **Incremento menor: Hace referencia a la actividad volcano-tectónica diaria registrada en el área con un número entre ≥ 50 a ≤ 500 VTs
 Incremento Mayor: Hace referencia a la actividad volcano-tectónica diaria registrada en el área con un número mayor a >500 VTs.

Durante el 2015 se presentaron en el VNR un total de 115 incrementos en la actividad sísmica de tipo VT, la mayoría de ellos corresponden con incrementos menores (<500 VTs) y sólo cinco de ellos con incrementos mayores (>500 VTs). En la Tabla 2 se describen los incrementos de mayor relevancia en el año, teniendo en cuenta el número de sismos tipo VT registrados y la energía sísmica liberada durante el incremento. Los incrementos

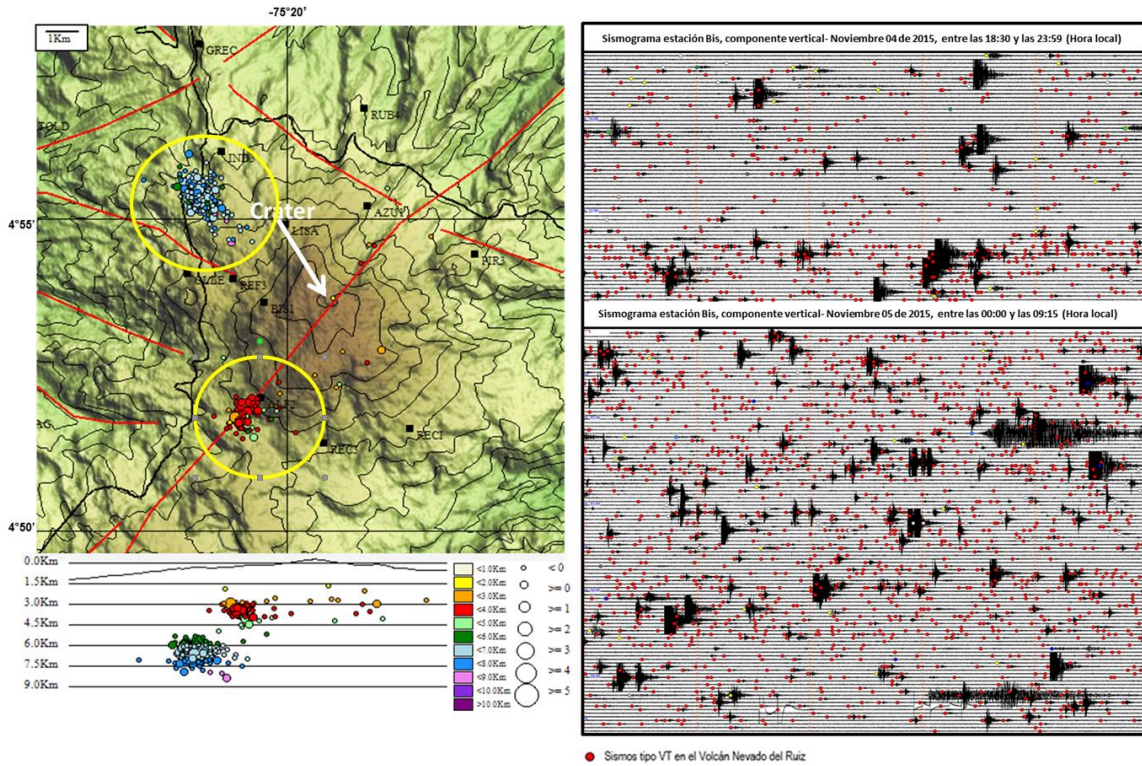
destacados durante el año fueron:

- Con relación al número de eventos VT registrados, se destaca el incremento mayor ocurrido los días 04 y 05 de Noviembre de 2015, localizado en los sectores Noroccidente y Suroccidente con respecto al cráter Arenas. (Tabla 2 y Figura 10). La magnitud de los eventos registrados osciló entre -0.6 y 2.0 M_L y la profundidad entre 1.9 y 8.3 km.
- Con relación a la energía sísmica liberada, resalta el incremento menor ocurrido el día 11 de Octubre de 2015, localizado en los sectores Nororiente y Occidente-Suroccidente con respecto al cráter Arenas. En el cual se destaca la sismicidad registrada, previa y durante el incremento, en los volcanes Paramillo del Cisne (VPC) y el Nevado de Santa Isabel (VNSI). En el VPC antecediendo el incremento se registraron dos sismos tipo Híbrido con magnitudes de 2.0 y 2.7 M_L y, en el VNSI, durante el incremento se registraron 5 sismos tipo VT con magnitudes entre 0.2 y 1.4 M_L . (Tabla 2 y Figura 11). La magnitud de los eventos registrados en el incremento osciló entre -0.4 y 3.3 M_L y la profundidad entre 3.4 y 5.4 km.

Tabla 2. Principales incrementos sísmicos en la actividad tipo VT en el área del Volcán Nevado del Ruiz durante el 2015.

INCREMENTOS SÍSMICOS DE ACUERDO AL NÚMERO DE VTs					
No. VTs	Fecha	Fuente sismogénica*	Magnitud (ML)	Profundidad (km)	Observaciones**
2572	04-05/11/2015	NW	-0.6 – 2.0	5.2 – 8.3	Incremento mayor
		SSW	-0.6 – 1.9	1.9 – 5.8	
1675	27-28/04/2015	SSW y en menor proporción en el sector Nororiente.	-0.2 – 1.4	3.7 – 7.2	Incremento mayor
720	15/03/2015	SSW	-0.5 – 1.9	0.7 – 4.0	Incremento mayor en el sector Sur-Suroccidente.
478	18/06/2015	NE	-0.2 – 2.6	2.8 – 5.1	Incremento menor
404	23/10/2015	NW	-0.4 – 0.5	4.1 – 8.5	Incremento menor
		en menor proporción en los sectores SE y N próximo	-0.6 – 1.1	2.5 – 5.3	
403	22/08/2015	NE y en menor proporción en el sector SE	-0.6 – 2.0	1.1 – 6.0	Incremento menor
380	18/01/2015	NW	-0.1 – 1.1	4.4 – 5.8	Incremento menor
		NE	-0.6 – 0.6	0.7 - 4.0	
		En menor proporción en los sectores WSW al SE y el C	-0.3 – 0.7	0.3 – 5.0	
378	20/02/2015	SE al SSW	-0.6 – 2.5	1.8 – 4.0	Incremento menor
358	16/03/2015	SW	-0.4 – 0.8	2.6 – 4.1	Incremento menor
311	07/02/2015	NE	0.3 – 1.9	2.3 – 5.8	Incremento menor
		NW	-0.3 – 0.5	4.8 – 7.0	
INCREMENTOS SÍSMICOS DE ACUERDO A LA ENERGÍA SÍSMICA LIBERADA					
No. VTs	Fecha	Fuente sismogénica*	Magnitud (ML)	Profundidad (km)	Observaciones**
220	11/10/2015	NE	-0.4 – 3.3	3.4 – 4.8	Incremento menor de mayor energía sísmica liberada durante el 2015.
		WSW	0.1 – 0.5	3.5 – 5.4	
185	08/11/2015	NE	0.0 – 3.1	3.6 – 4.7	Incremento menor
224	03/05/2015	SSW	-0.2 – 2.8	3.4 - 4.3	Incremento menor
286	08/02/2015	NE	-0.4 – 2.7	3.1 – 5.4	Incrementos menor
		NW	-0.2 – 0.8	4.6 – 5.4	
478	18/06/2015	Incremento menor AL NE (Ver descripción en la parte superior de la tabla)			
97	20/11/2015	E	-0.4 – 2.6	1.8 – 4.2	Incremento menor
378	20/02/2015	SE al SSW	-0.6 – 2.5	1.8 – 4.0	Incremento menor
58	20/01/2015	Sectores del SSW al NE	-0.5 – 2.4	1.2 – 5.0	
74	07/11/2015	Sectores NW, NE, SE y Cráter	-0.5 - 2.4	1.3 – 7.6	
403	22/08/2015	Incremento menor AL NE (Ver descripción en la parte superior de la tabla)			

*Las fuentes sismogénicas en el edificio volcánico del VNR mencionadas con referencia al Cráter Arenas. C: Cráter, E: Oriente, N: Norte, NW: Noroccidente, NNW distal: Nor-Noroccidente, SE: Suroriente, SW: Suroccidente, SSW: Sur-Suroccidente, WSW: Occidente-Suroccidente.
**Incremento menor, hace referencia a la actividad tipo VT registrada por día en el área con un número menor o igual a ≤500 VTs e Incremento mayor, actividad VT registrada por día con un número mayor a >500 VTs.



● Sismos tipo VT en el Volcán Nevado del Ruiz

Figura 10. Incremento de la actividad de fractura en el VNR los días 04-05 de Noviembre de 2015. Mapa de localización hipocentral de los sismos (Izquierda), en los círculos amarillos, las fuentes sísmicas activas durante el incremento. Sismograma de las señales sísmicas registradas durante el incremento (Derecha).

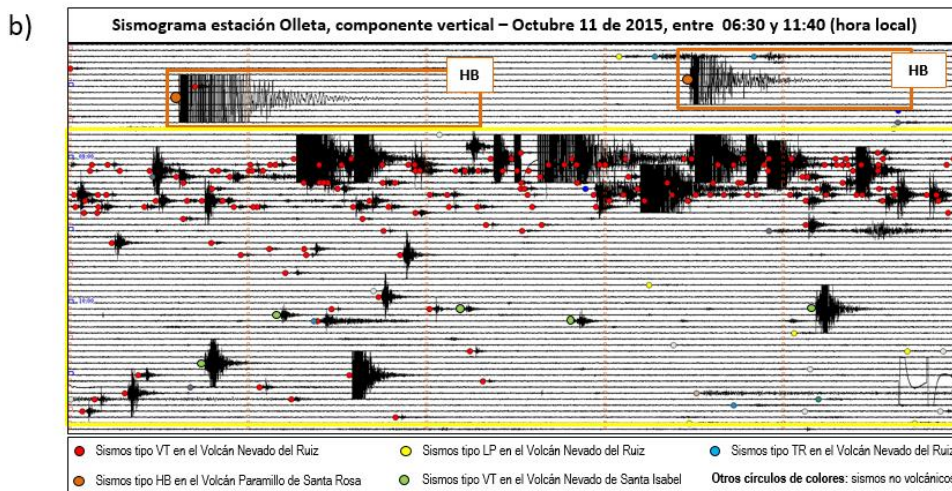
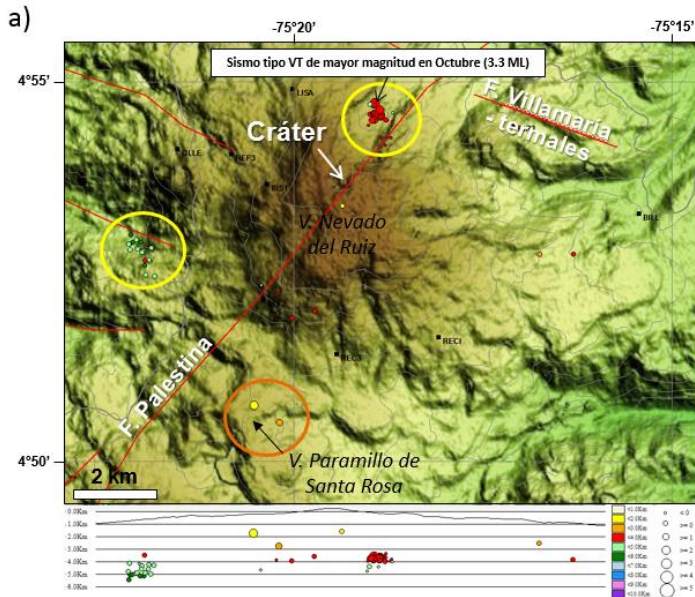


Figura 11. Incremento de la actividad de fractura en el VNR el día 11 de Octubre de 2015. a) Mapa de localización hipocentral de los sismos, en círculo amarillo sectores sísmicos en el VNR durante el incremento, y en círculo naranja localización de los sismos de tipo HB registrados en el volcán Paramillo del Cisne (VPC) precediendo el incremento en el VNR. Los colores cálidos representan sismos a profundidades menores de <4 km y colores fríos eventos a profundidades mayores o iguales a ≥ 4 km. b) Sismograma de las señales sísmicas registradas durante el incremento. Recuadro naranja: forma de onda de los sismos tipo HB del VPC. Recuadro amarillo: forma de onda de los sismos tipo VT registrados en el VNR (círculo rojo) y en el VNSI (círculo verde).

Con relación a la energía sísmica liberada diaria de los eventos registrados en el VNR durante el año 2015, se observa que los eventos de tipo VT de mayor energía sísmica, ocurrieron como parte de incrementos menores en la actividad sísmica del volcán. En la siguiente Tabla 3 se listan los 20 días de mayor nivel energético en el VNR, especificando el fenómeno asociado (incremento o evento aislado) y el número de eventos con magnitudes mayores a $>1.0 M_L$.

Tabla 3. Principales eventos sísmicos tipo VT en cuanto a energía sísmica liberada, registrados en el área del Volcán Nevado del Ruiz durante el 2015.

Fecha	Energía sísmica liberada relacionada con:	No. VTs con M_L			Información del evento(s)
		$\geq 1 - \leq 1.9 M_L$	$\geq 2 - \leq 2.9 M_L$	$\geq 3 M_L$	
11/10/2015	Incremento menor de alta energía sísmica liberada	4	3	1	Ver Tabla 1 y 2
08/11/2015	Incremento menor de alta energía sísmica liberada	4		1	Ver Tabla 1 y 2
03/05/2015	Incremento menor de alta energía sísmica liberada	1	1		Ver Tabla 1 y 2
08/02/2015	Eventos aislados, no asociados a incrementos en la actividad sísmica del VNR.	1	1		Ver Tabla 1 y 2
18/06/2015	Incremento menor de alta energía sísmica	8	2		Ver Tabla 1 y 2
20/11/2015	Incremento menor de alta energía sísmica		1		Ver Tabla 1 y 2
20/02/2015	Incremento menor de alta energía sísmica	5	4		Ver Tabla 1 y 2
23/02/2015	Evento aislado, no asociado a incrementos en la actividad sísmica del VNR.		1		Ver Tabla 1
25/03/2015	Eventos aislados, no asociados a incrementos en la actividad sísmica del VNR.	1	2		Ver Tabla 1
20/01/2015	Incremento menor de alta energía sísmica		2		Ver Tabla 1 y 2
03/06/2015	Evento aislado, no asociado a incrementos en la actividad sísmica del VNR.		1		Ver Tabla 1
07/11/2015	Incremento menor de baja energía sísmica	1	1		Ver Tabla 1 y 2
04/06/2015	Eventos aislados, no asociados a incrementos en la actividad sísmica del VNR.	2	1		Ver Tabla 1
22/08/2015	Incremento menor de baja energía sísmica	7	1		Ver Tabla 1 y 2
28/03/2015	Eventos aislados, no asociados a incrementos en la actividad sísmica del VNR.		1		Ver Tabla 1
05/11/2015	Incremento mayor de baja energía sísmica liberada	11	1		Ver Tabla 1 y 2
27/07/2015	Eventos aislados, no asociados a incrementos en la actividad sísmica del VNR.	1	1		Ver Tabla 1
21/10/2015	Incremento menor de baja energía sísmica		1		Ver Tabla 1 y 2
12/04/2015	Incremento menor de baja energía sísmica	10	1		
15/09/2015	Incremento menor de baja energía sísmica	4	1		

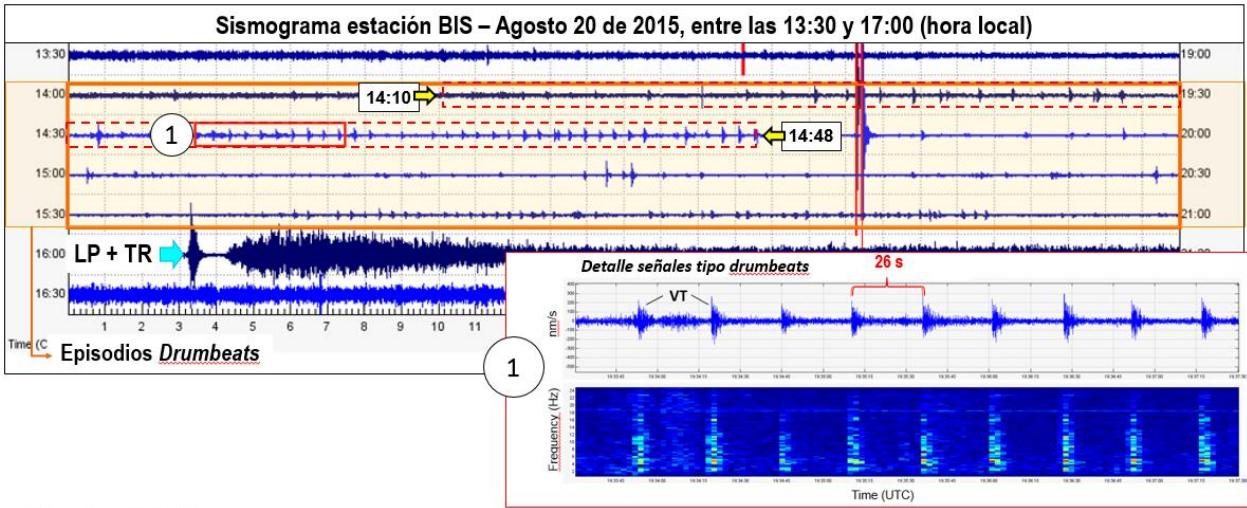
Incremento menor, hace referencia a la actividad tipo VT registrada en el área con un número menor o igual a ≤ 500 VTs y, *Incremento Mayor*, hace referencia a la actividad tipo VT registrada en el área con un número mayor a >500 VTs.

1.2.2 Sismicidad tipo *drumbeat* (DB)

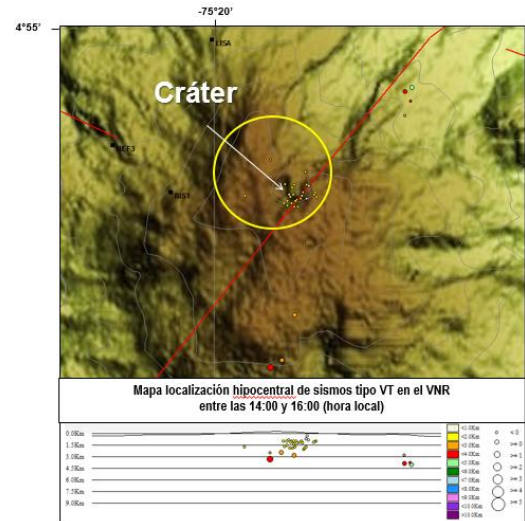
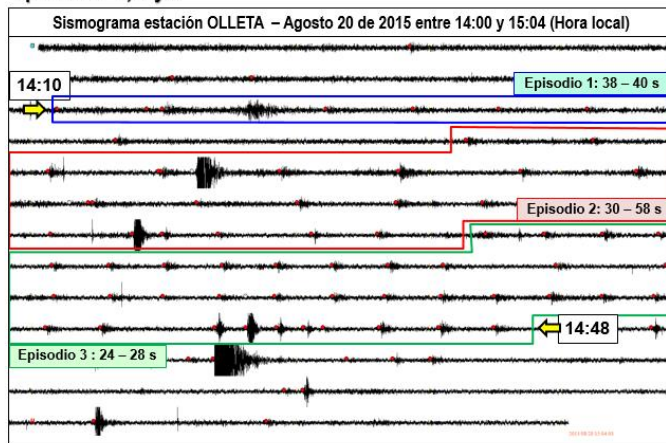
Durante los meses de Agosto a Noviembre de 2015, se registraron por primera vez en lo que se conoce de la actividad sísmica del VNR, diversos episodios de sismicidad tipo *drumbeat* (Moran et al. 2008) o “golpes de tambor”. Estos episodios fueron de corta duración (Tabla 4) y estuvieron caracterizados por el registro de una serie de sismos de fractura de muy baja energía y en la mayoría de los casos no localizable, que ocurrieron en intervalos de tiempo relativamente regulares y presentaron formas de onda y energía similares. El episodio de sismicidad tipo *drumbeat* destacado en el año 2015, ocurrió el día de 20 de Agosto de 2015 (Tabla 4, Figura 12 y Figura 13). Este episodio presentó un nivel energético mayor que los demás y algunos de los sismos fueron localizados indicando como fuente principal el Cráter Arenas.

Tabla 4. Episodios sísmicos tipo “drumbeats” registrados en el VNR durante el año 2015.

Fecha episodio	Hora local	Duración episodio (min)	Tipo señales sísmicas	Periodicidad señales (s)	Localización sismos	Magnitud máxima (ML)
Agosto 20/2015	14:10 – 14:48	Episodio 1: < 5 min Episodio 2: 15 min Episodio 3: 15 min	Sismos volcano-tectónicos	38 – 40 s 30 – 58 s 24 – 28 s	Cráter Arenas	<0.1 ML
	15:36 – 15:55	Episodio 4: 19 min	Sismos volcano-tectónicos	17 – 23 s	Pocos localizables Cráter Arenas	<0.1 ML
Septiembre 20/2015	19:20 – 19:28	Episodio 1: 8 min	Sismos volcano-tectónicos	30 – 34 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Octubre 22/2015	19:01 – 19:30	Episodio 1: 29 min	Sismos volcano-tectónicos	7 – 9 s, 8.5 – 10s y 9 – 12s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	20:01 – 20:23	Episodio 2: 22 min	Tren de Sismos VT	65 – 91 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	20:33 – 20:53	Episodio 3: 20 min	Sismos VT en trenes o como eventos múltiples	56 – 81 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	21:05 – 21:38	Episodio 3: 33 min	Sismos VT en trenes o como eventos múltiples	18 – 24 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
Noviembre 13/2015	11:07-11:23	Episodio 1: 16 min	Sismos volcano-tectónicos	31-34 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	12:19-12:37	Episodio 2: 18 min	Sismos volcano-tectónicos	27-30 s	No localizables	Nivel energético muy bajo
	13:10-13:19	Episodio 3: 9 min	Sismos volcano-tectónicos	22-24 s	No localizables	Nivel energético muy bajo

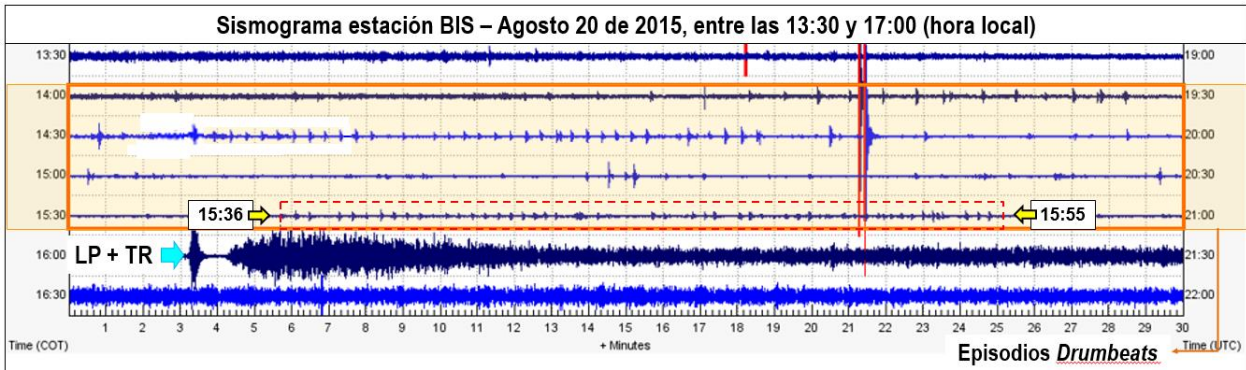


Episodios 1, 2 y 3

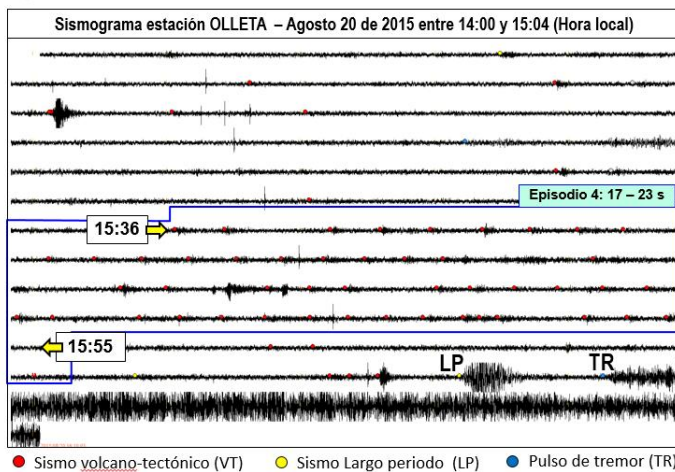


***Drumbeats* VNR en Agosto 20 de 2015**

Figura 12. Episodios de actividad sísmica tipo “drumbeat” en el VNR registrados el día 20 de Agosto de 2015 entre las 14:00 y 16:00 (Hora local). Sismograma del registro sísmico de los episodios en la componente vertical de la estación BIS (Parte superior, recuadro naranja). Sismograma del registro sísmico de los episodios tipo “drumbeat” entre las 14:10 y 14:48, en la componente vertical de la estación de OLLETA (Parte inferior izquierda). Sismograma y espectrograma de detalle de las señales registradas (Parte inferior derecha), donde se puede apreciar la periodicidad similar entre las señales. Mapa de localización hipocentral de las señales registradas localizables (Parte inferior derecha). Nótese que los episodios tipo “drumbeat” anteceden una señal múltiple de fluido (LP+TR) de larga duración.



Episodio 4



Drumbeats VNR en Agosto 20 de 2015

Figura 13. Episodios de actividad sísmica tipo “drumbeat” en el VNR registrados el día 20 de Agosto de 2015 entre las 14:00 y 16:00 (Hora local). Sismograma del registro sísmico de los episodios en la componente vertical de la estación BIS (Parte superior, recuadro naranja). Sismograma del registro sísmico del episodio tipo “drumbeat” entre las 15:36 y 15:55, en la componente vertical de la estación de OLLETA (Parte inferior izquierda). Nótese que los episodios tipo “drumbeat” anteceden un sismos múltiple de fluido (LP+TR) de larga duración.

Los episodios sísmicos tipo “drumbeat” pueden estar constituidos de una serie de sismos tipo VT así como también de sismos tipo LP o HB. Este tipo de episodios están relacionados con fenómenos generalmente asociados a la salida de domos de lava¹ a la superficie de la tierra a partir de magmas viscosos (Figura 14), siendo éstos una manifestación del mecanismo de ascenso del magma de alta viscosidad a través de un conducto volcánico cerca de la superficie de extrusión. Por tal razón, la sismicidad tipo “drumbeat” es considerada como un fuerte indicador de movimiento del magma a poca

¹ **Domo de lava:** es un montículo de lava viscosa que se emplaza sobre el conducto de emisión de un volcán (Figura 20a). La tasa de crecimiento de los domos puede variar de horas a días, años o cientos de años, y estos pueden alcanzar volúmenes de decenas de metros hasta varios kilómetros cúbicos.

profundidad dentro del edificio volcánico y de la probable formación de un domo sobre el conducto de emisión (Power & Lalla, 2007).

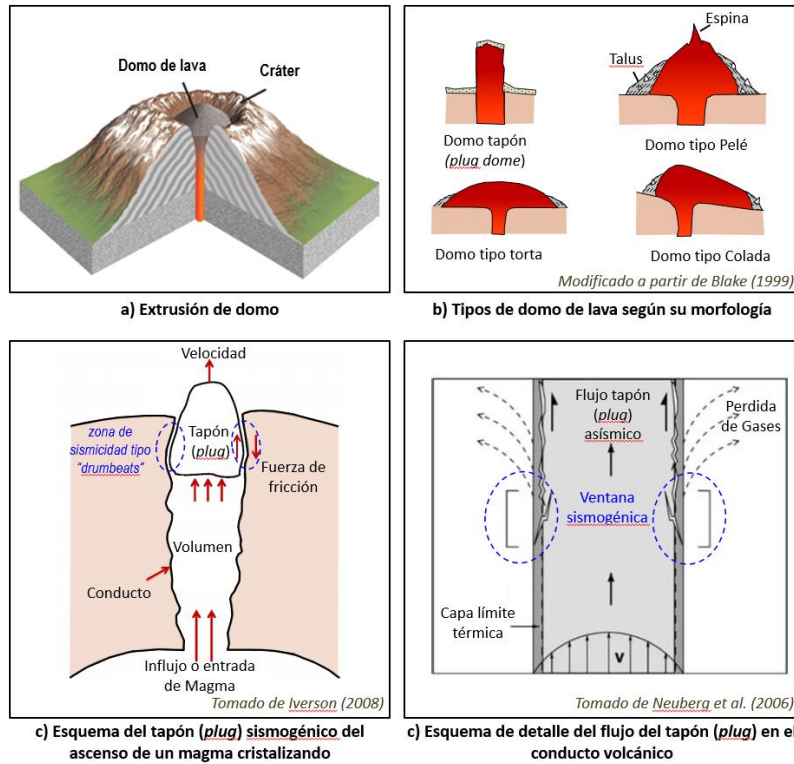


Figura 14. Domo de lava, características y proceso de formación. a) Esquema de la extrusión domo sobre el conducto de emisión de un volcán. b) Formas típicas de los domos de lava. c) y d) Esquema de la dinámica de flujo del magma-tapón (plug) y el conducto volcánico y sismicidad asociada.

En la mayoría de los casos documentados, la salida de domos de lava ha estado acompañada de episodios de sismicidad tipo *drumbeat* de niveles energéticos importantes que ocurren en periodos de horas o días durante varias semanas, como por ejemplo en los volcanes colombianos del Nevado del Huila (Ingeominas, Hoy Servicio Geológico Colombiano-Informe Interno 2008 y 2010, Cardona *et al* 2009) y Galeras (Ingeominas, Hoy Servicio Geológico Colombiano-Informe Interno 2006), en el Mount Saint Helens en Washington (Pierson *et al* 2007, Moran *et al* 2008, Waite *et al* 2008), Soufrière Hills en la Isla de Monserrat (Luckett *et al* 2007), Augustine en Alaska (Power & Lalla 2007, Syracuse *et al* 2011), entre otros. En el caso del volcán Nevado del Ruiz, aunque estos episodios fueron de muy corta duración y de niveles energéticos muy bajos (Tabla 4), también acompañaron la salida de un domo de lava en la superficie del cráter Arenas, que pudo ser confirmado a través de las imágenes de radar COSMO-SkyMed de la Agencia Italiana Espacial (ASI) mostradas en el trabajo de Lundgren *et al*, 2015 en coautoría con personal del Servicio Geológico Colombiano (Figura 15). A pesar de los esfuerzos realizados por el Servicio Geológico Colombiano para tener una observación directa del domo a través de varios sobrevuelos, las condiciones atmosféricas y la dinámica de columna de gases

(densa y espesa) (Figura 15) no ha permitido hasta el momento de elaboración de este informe la observación directa de dicho fenómeno. Es de anotar, que los eventos sísmicos de este tipo registrados en el Volcán Nevado del Ruiz son considerados de nivel energético muy bajo, lo cual hace suponer que estén asociados con ascenso de volúmenes muy pequeños de material magmático a la superficie.

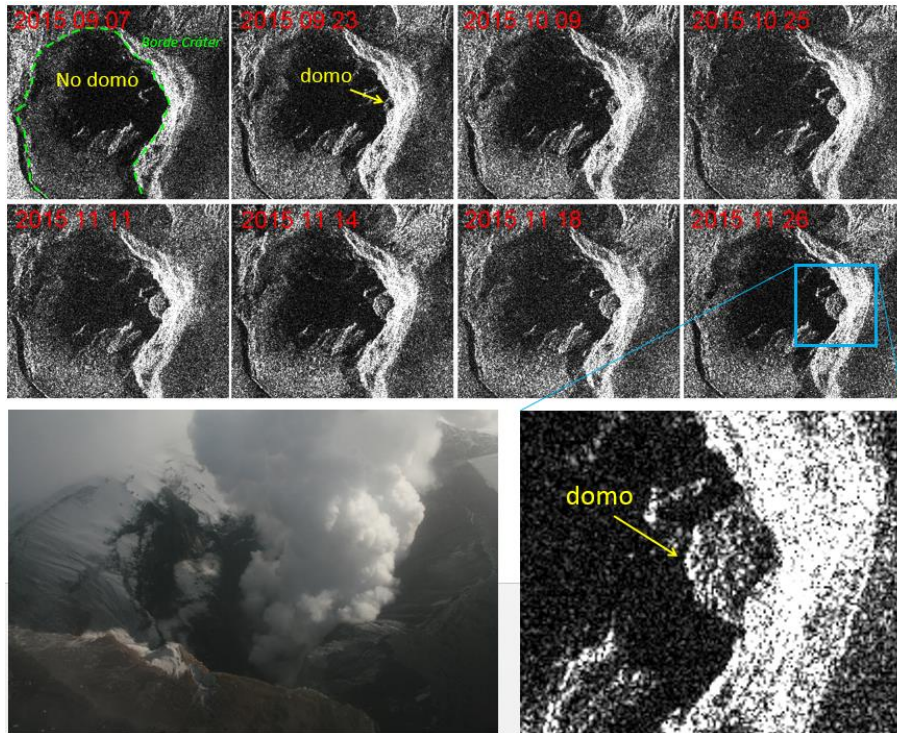


Figura 15. Crecimiento domo de lava en el volcán Nevado del Ruiz a finales del año 2015. Imágenes de radar COSMO-SkyMed de la Agencia Italiana Espacial (ASI), muestran el crecimiento del domo de lava entre Septiembre 07 y 23 de 2015 (Tomado y modificado de Lundgren et al. 2015). Fotografía del cráter Arenas realizada en sobrevuelo del día 19 de Noviembre de 2015 (Parte inferior izquierda).

1.2.3 Sismos híbridos (HB)

La actividad de tipo HB en el VNR durante el 2015 mostró niveles similares al año anterior en cuanto al número de eventos registrados y valores ligeramente menores, en cuanto a la energía sísmica liberada (Figura 16 y Figura 17). Un total de 93 sismos tipo HB fueron registrados durante el 2015. Estos eventos sísmicos estuvieron localizados principalmente en el Cráter y en el sector Suroriente del edificio volcánico y en una menor proporción en los sectores Norte distal y Noroccidente de la estructura volcánica (Figura 16). Las profundidades oscilaron entre 0.4 y 6.0 km y las magnitudes locales (M_L) entre -0.1 y 2.1 M_L .

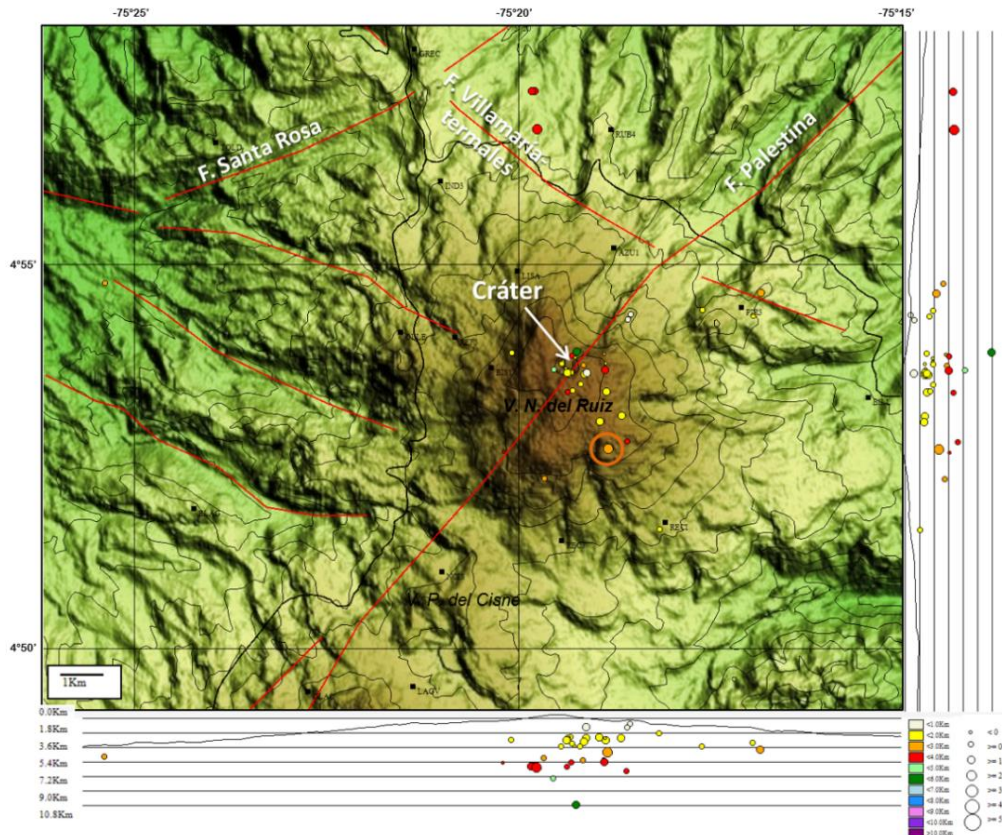


Figura 16. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo HB (círculos de colores) registrados en el área del VNR durante año 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas instaladas en el área. El círculo naranja señala el sismo tipo HB de mayor magnitud registrado durante el año.

El sismo tipo híbrido de mayor magnitud registrado durante el 2015, corresponde con el sismo registrado el día 23 de Octubre de 2015 a las 21:15 (Hora local) con una magnitud local de 2.1 M_L , localizado en el sector Sureste con respecto al cráter Arenas a una profundidad de 2.3 km (Figura 16).

1.2.4 Sismos de largo período (LP)

Durante todo el año 2015 se registró sismicidad asociada a dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos, tipo LP, mostrando variaciones con relación a la tasa diaria de ocurrencia y a la forma de registro, como será detallado más adelante. Las tasas diarias de sismicidad para este tipo de sismos fueron en promedio de 28 eventos por día, con un máximo de 175 eventos registrados el 08 de Enero de 2015; si bien esta proporción se mantuvo muy estable a lo largo del año, los meses de Enero y Septiembre muestran las mayores tasas diarias de sismicidad (Figura 6) mientras el mes de Diciembre las menores. En total se clasificaron dentro de esta categoría de sismos volcánicos 8779 eventos.

En cuanto a la energía sísmica liberada por los sismos tipo LP, medida a partir del desplazamiento reducido (D_r), mostró valores variables. Sin embargo en Mayo, finales de Agosto y los meses de Septiembre y Octubre, fueron los periodos de tiempo más energéticos. El mayor el valor de D_r promedio alcanzado durante el año fue de 25.4 cm^2 , correspondiente al evento sísmico registrado el día 15 de Mayo de 2015 a las 02:47 (hora local), localizado por atenuación de amplitudes, en el flanco oriental del Cráter Arenas, (Figura 17, Tabla 5). En la Tabla 5 se presenta un resumen de los sismos con mayor D_r promedio de cada mes del año 2015.

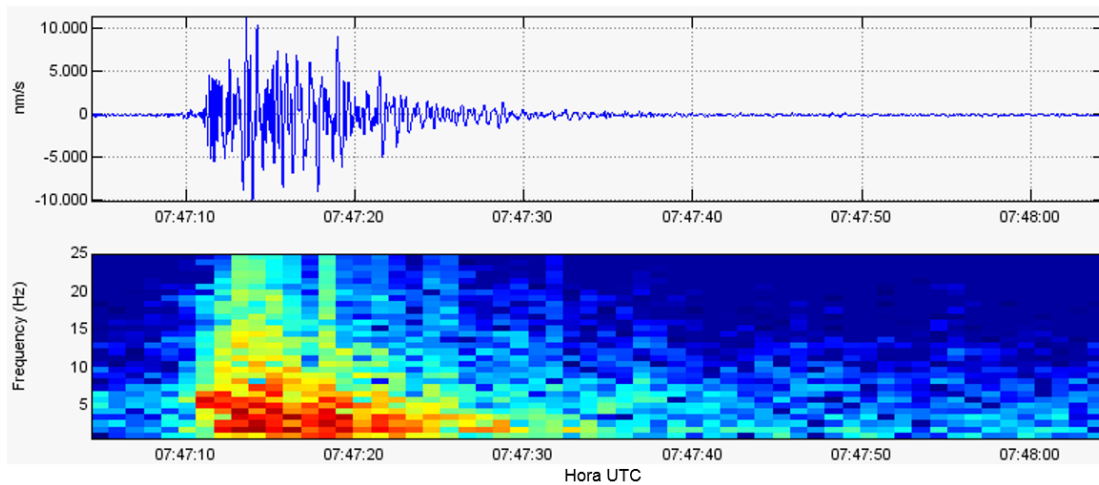
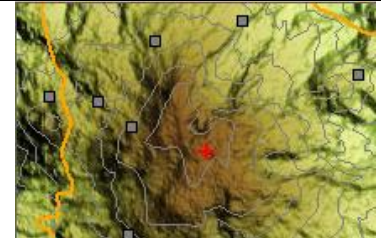
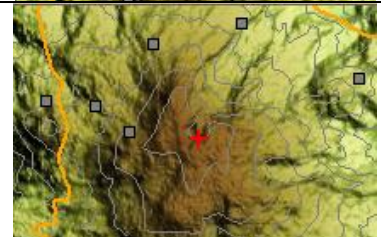
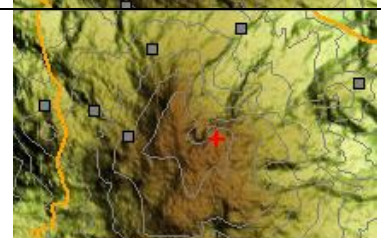
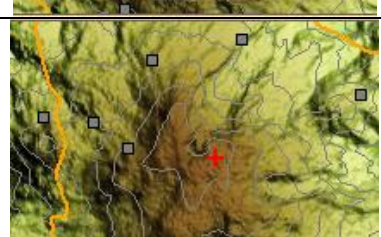
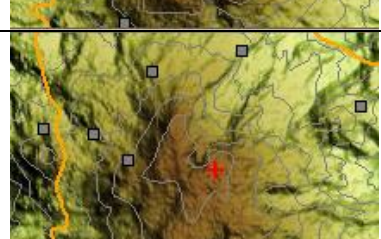
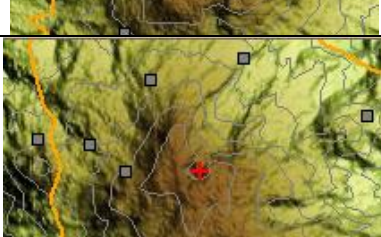
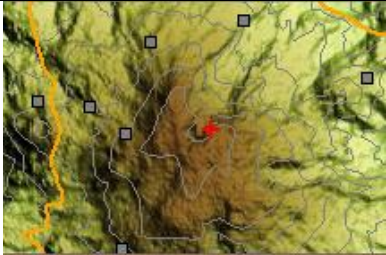
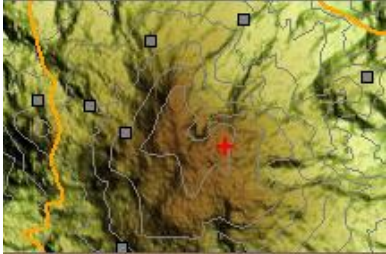
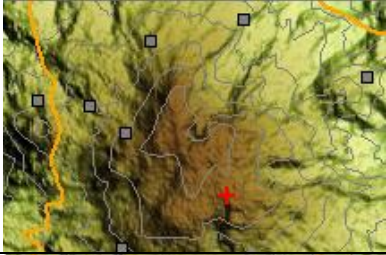
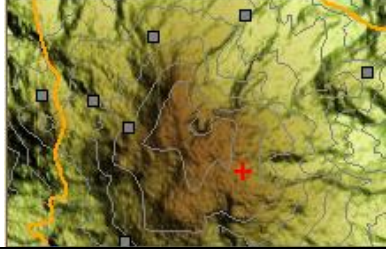


Figura 17. Registro sísmico y espectrograma del sismo tipo LP de mayor desplazamiento reducido registrado durante el año 2015 en el VNR, ocurrido el 15 de Mayo a las 02:47 (Hora local), con un D_r promedio de 25.4 cm^2 y una duración 35 s. Componente vertical, estación OLLETA.

Tabla 5. Principales eventos tipo LP de cada mes del año 2015, registrados en el VNR. Los cuadrados representan las estaciones sismológicas, y la cruz roja el epicentro del sismo.

Hora local	Fecha	D_r prom. cm^2	Localización
03:22	24/01/2015	18.8	
16:29	04/02/2015	11.5	

02:07	25/03/2015	18.9	
19:52	18/04/2015	7.08	
02:47	15/05/2015	25.4	
00:26	23/06/2015	12.4	
00:57	20/07/2015	20.9	
01:04	19/08/2015	12.4	

22:54	12/09/2015	10.52	
19:37	23/10/2015	24.4	
16:38	04/11/2015	16.13	
01:24	30/12/2015	9.93	

Mediante la aplicación del método de atenuación de las máximas amplitudes de onda con la distancia, fue posible realizar la localización de los eventos tipo LP. Estos se concentraron principalmente en el sector Suroriental, Oriental y Sur al cráter Arenas, y a partir del mes de Mayo también en el cráter y en los alrededores del mismo (Figura 18). De acuerdo a las curvas de atenuación la mayoría de eventos mostraron un carácter superficial.

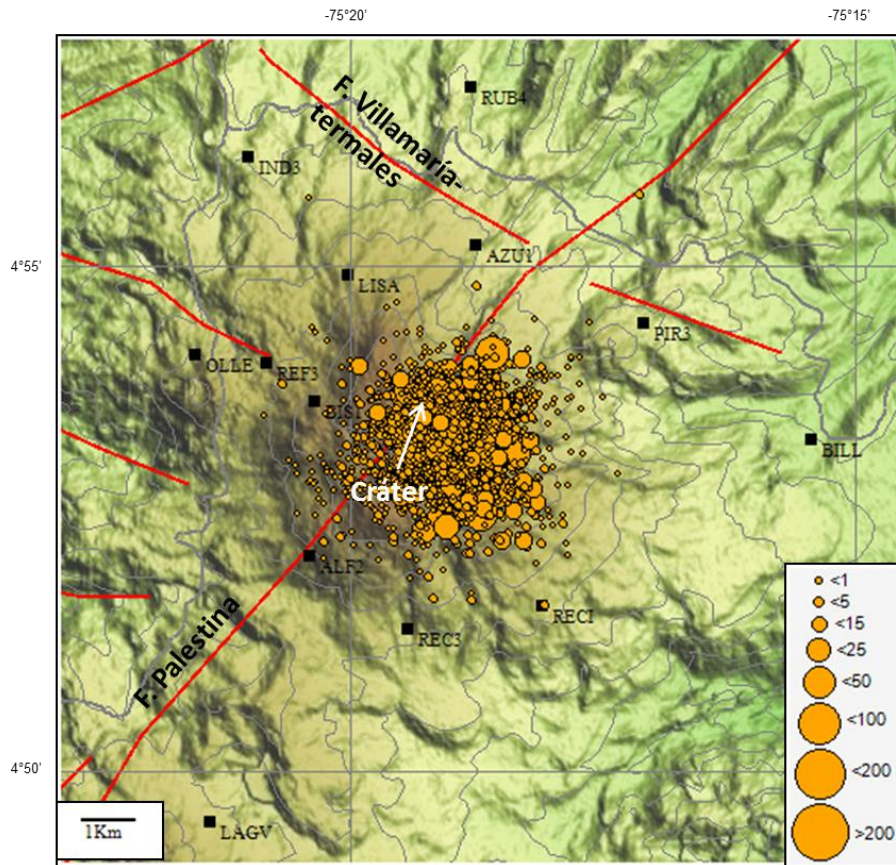


Figura 18. Mapa de localización epicentral de sismos tipo LP (Círculos naranja) registrados durante el año 2015 en el VNR. Los cuadros negros representan las estaciones sismológicas.

Con relación a la forma de registro es importante mencionar que durante el periodo comprendido entre Enero y Agosto de 2015, los sismos tipo LP se registraban de manera individual o antecedendo episodios de temblor continuo, y en algunas ocasiones al final de estos episodios (Figura 19). A finales de Agosto de 2015 comenzaron a registrarse sismos múltiples de fluidos, este término describe la ocurrencia de varios eventos sucesivos cuyo origen está relacionado con la dinámica de fluidos, por ejemplo tipo LP, pulsos de temblor y temblor continuo, con niveles energéticos variables (Figura 20), sin embargo en la mayoría de los casos la última señal registrada fue la mayor energía.

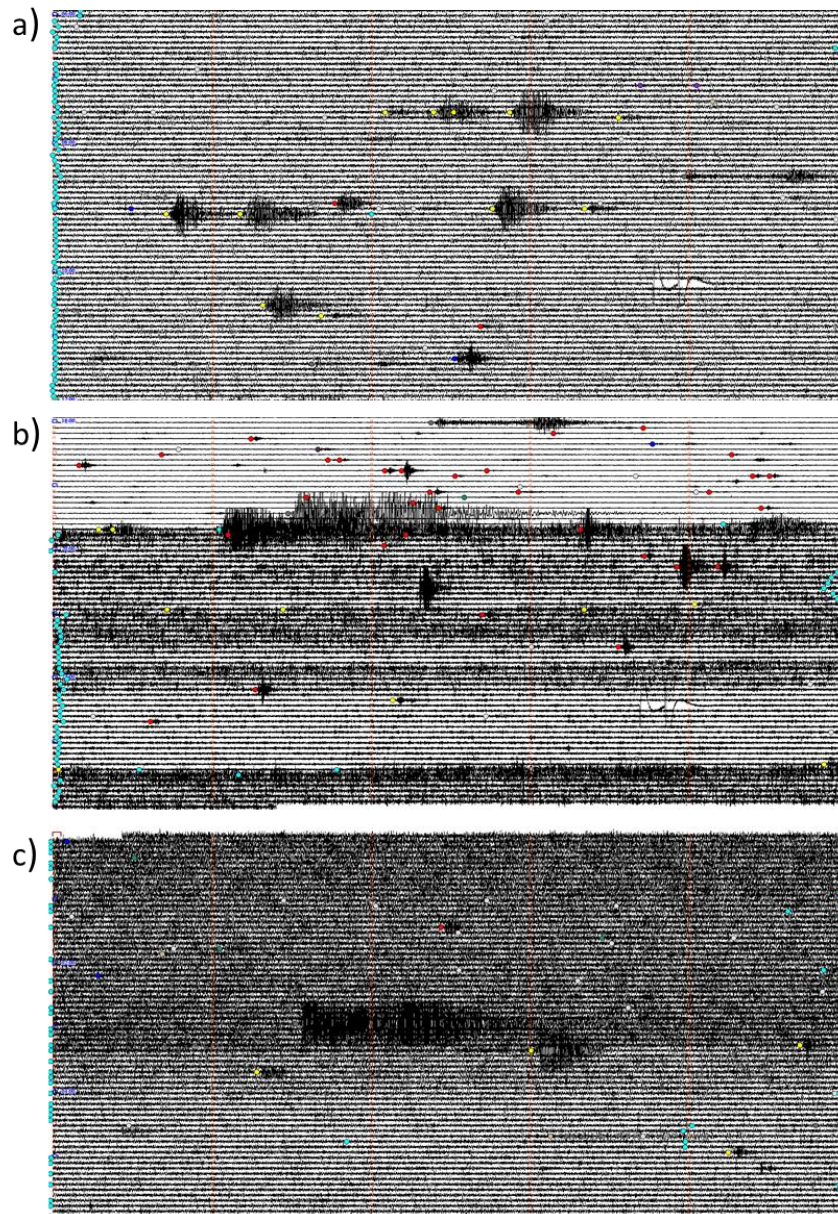


Figura 19. Ejemplos de registro de sismos LP en el VNR. a) sismos tipo LP que ocurren separadamente. b) Sismos LP antecediendo pulsos de tremor y episodios de tremor continuo. c) Sismos LP que finalizan ciclos de los episodios de tremor continuo. Los sismogramas corresponden 6 horas de registro de la componente Z de OLLETA, los días 8 de Febrero a partir de las 06:00 (hora local), 14 de Abril desde las 18:00 (hora local) y 23 de Mayo a partir de las 00:00 (hora local) respectivamente.

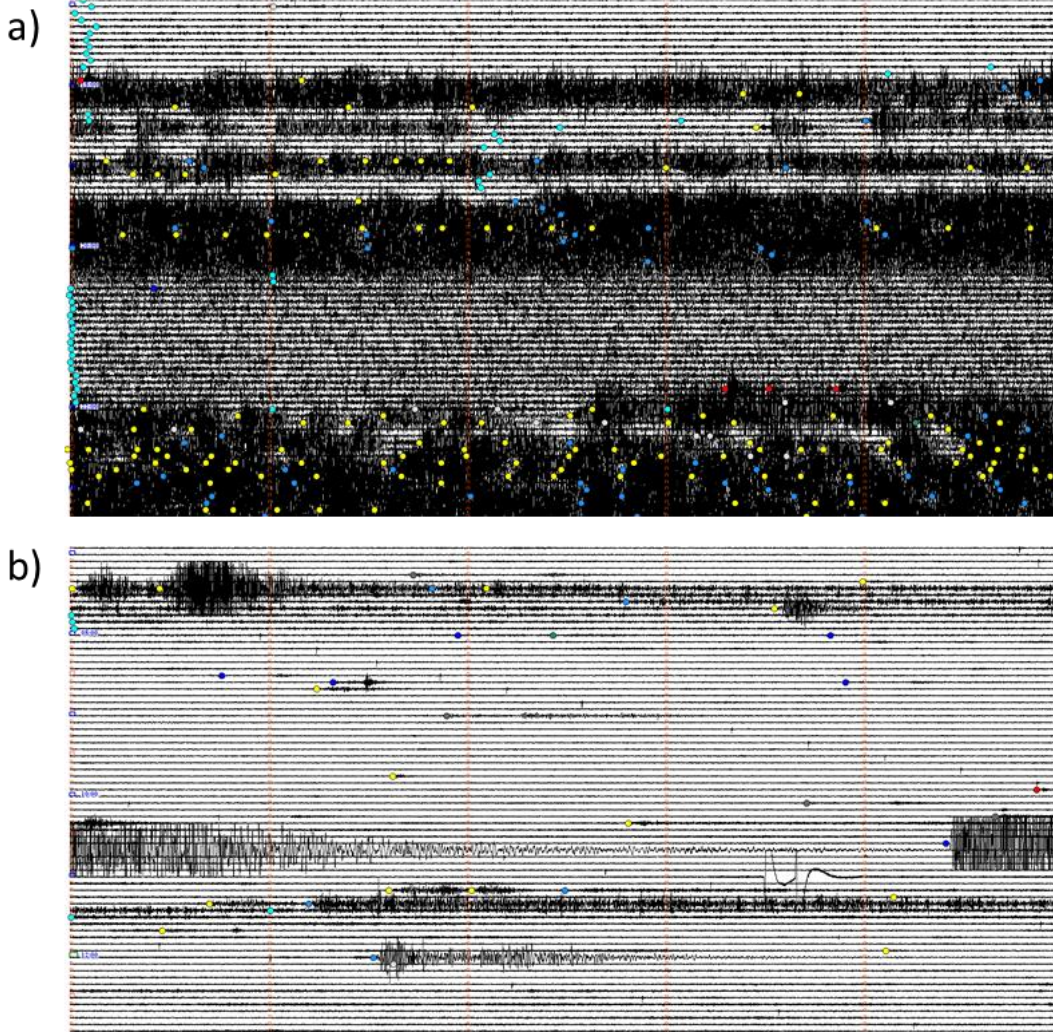


Figura 20. Ejemplos de sismos múltiples de fluidos en el VNR. a) sismos tipo LP registrados conjuntamente con tremor espasmódico en medio de tremor continuo de fondo. b) Sismos LP con pulsos de tremor y episodios de tremor continuo. Los sismogramas corresponden 6 horas de registro de la componente Z de OLLETA, los días 29 de Agosto a partir de las 17:00 (hora local) y 14 de Septiembre desde las 07:00 (hora local) respectivamente.

Con relación a la duración de los eventos, éstas variaron entre 4 y 86 s, este último valor fue registrado el día 29 de Junio de 2015 a las 05:09. A lo largo del año se notó que entre Julio y Octubre los eventos mostraron, en general, mayor duración y amplitud, la relación entre estos dos parámetros evidencia una correspondencia proporcional entre ellos, sin embargo durante el mes de Agosto es notorio que los sismos se atenúan rápidamente, presentando amplitudes considerables y codas (duración) cortas.

Las frecuencias asociadas a la máxima amplitud de los sismos tipo LP, oscilaron entre 0.4 y 16.6 Hz, con una frecuencia promedio 4.3 Hz. En la Figura 21a se puede observar que las frecuencias menores a 6.0 Hz y mayores a 2.0 Hz predominaron la mayor parte del

año. Se destaca el registro de señales tipo LP con frecuencias menores a 0.7 Hz a partir de Junio de 2015 y hasta finales del mismo año, siendo más numerosas a finales de Septiembre y principios de Octubre, Figura 21b; estas señales sísmicas son consideradas VLP, sismos de muy largo periodo, por sus siglas en inglés very long period, un ejemplo de estos sismos puede observarse en la Figura 22.

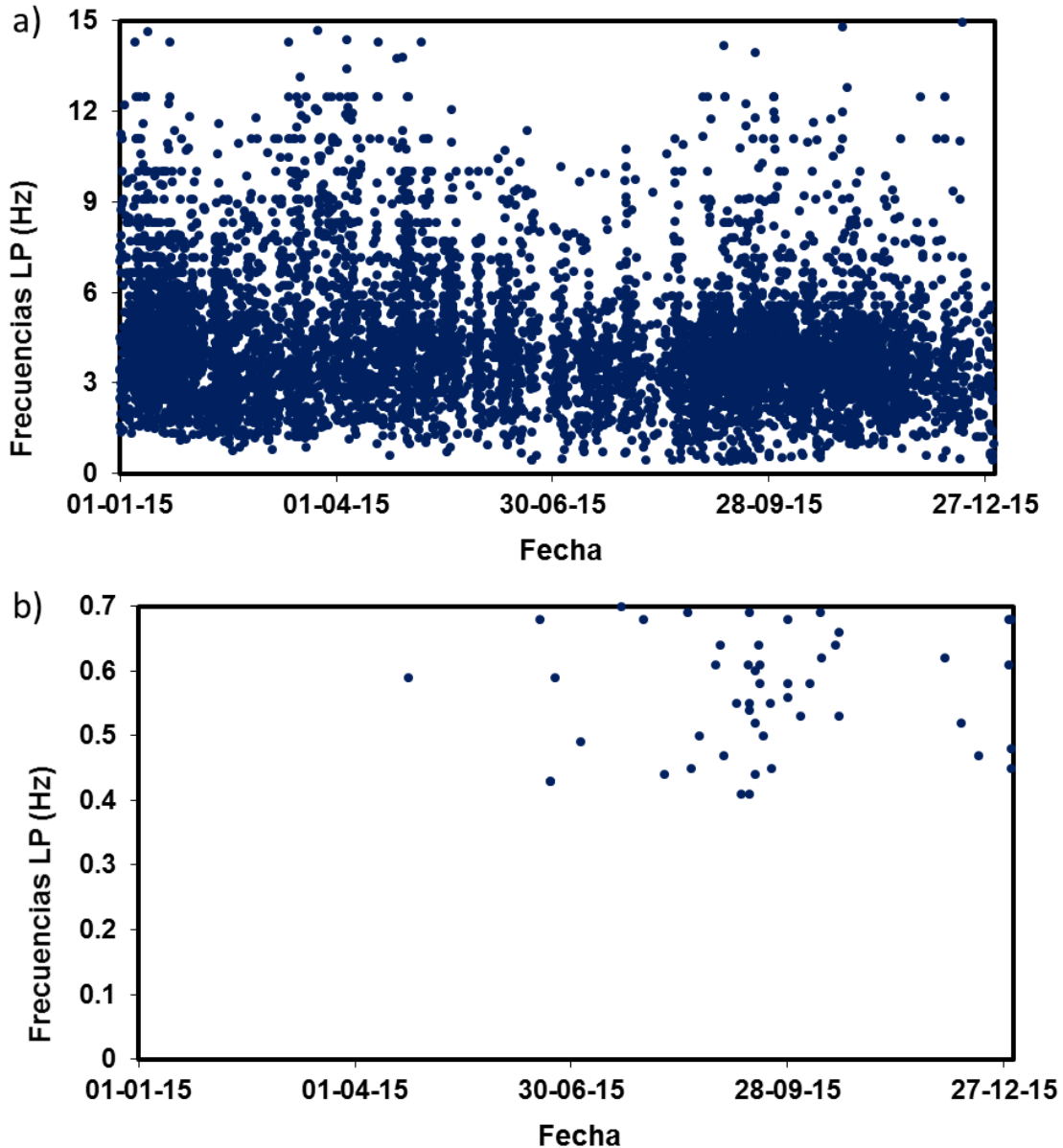


Figura 21. Frecuencias asociadas a la máxima amplitud de los eventos sísmicos tipo LP registradas durante el año 2015 en el VNR. a) Frecuencias entre 0.4 y 16.6 Hz. b) Detalle para frecuencias menores a 0.7 Hz.

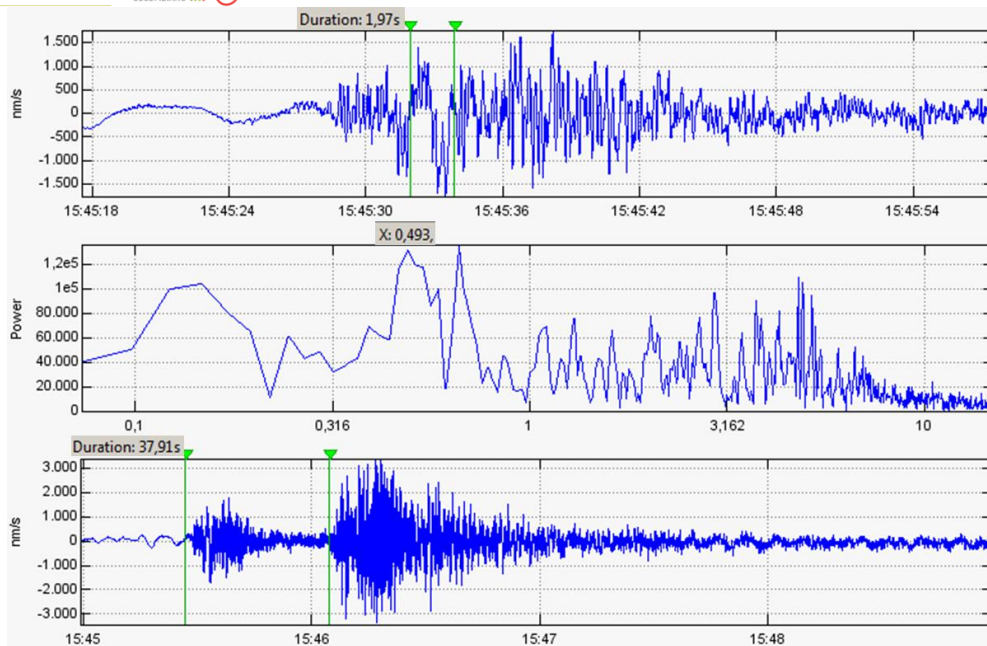


Figura 22. Registro sísmico y espectro de un sismo tipo VLP registrado el 3 de Septiembre a las 10:45 (hora local) en el VNR. Este evento es registrado con un LP, con el cual anteceden un pulso de tremor. El sismograma corresponde a la componente vertical, estación OLLETA, banda ancha.

Las frecuencias complejas y el factor Q_r (factor de calidad debido a pérdidas por radiación de la energía) obtenidos a partir de la aplicación del método Sompi, muestran que los sismos LP analizados están en su mayoría en las zonas de líquido+burbuja y líquido+burbuja+gas (Figura 23), sin embargo para finales de Agosto y hasta el mes de Noviembre se observa que varios sismos alcanzaron valores de Q_r dentro de la zona ceniza+gas. Este cambio en la gráfica es simultáneo con el cambio en la actividad del volcán, que como ya se mencionó presentó variaciones a partir de finales de Agosto con relación a la forma de ocurrencia de las señales asociadas a movimiento de fluidos, y es coherente con las tasas de desgasificación del volcán y con las emisiones de ceniza, las cuales se incrementaron entre Agosto y Noviembre de 2015.

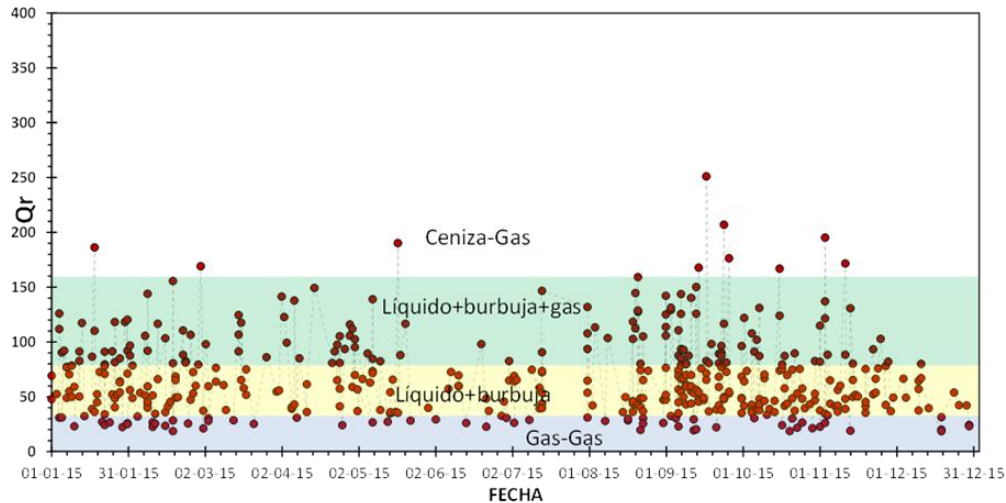


Figura 23. Qr del volcán Nevado del Ruiz obtenido mediante el método Sompí, Enero-Diciembre de 2015.

Con el propósito de caracterizar las señales sísmicas múltiples de fluidos (entre ellas: LP + TR, LP + LP y TR + TR), particularmente para los meses de Octubre a Diciembre de 2015, periodo de mayor registro de estas señales, se realizó una gráfica de la duración entre el inicio de la primera señal sísmica y el inicio de la de la segunda señal sísmica (o de mayor nivel energético). Para los casos, que la señal principal o de mayor nivel energético es antecedida por dos o incluso 3 sismos LP, se hizo la misma consideración (duración entre la primera señal sísmica y la señal de mayor energía) (Figura 24). Los eventos de este tipo durante los meses de Octubre a Diciembre que fueron antecedidos por un sismo LP, mostraron una diferencia de tiempo entre el inicio del LP y la señal sísmica de mayor nivel energético entre 4.8 y 102.1, con un promedio de duración entre ambas señales de 22.8 s. Los eventos de mayor energía precedidos por dos sismos LP se presentaron en menor proporción con respecto a los antes mencionados, sus diferencias de tiempo oscilaron entre 8.6 y 59 s, con promedio de 33.8 s. Las señales de mayor nivel energético antecedidas por tres sismos LP, fueron menos comunes, éstas mostraron tiempos de separación entre 27.1 y 91 s, y promedios de 52.6 s.

En cuanto a la energía sísmica liberada por los sismos múltiples de fluidos, se graficaron los desplazamientos reducidos (D_r) de los eventos de mayor energía (Figura 25). La energía sísmica liberada para los eventos principales precedidos por un sismo LP, mostraron un D_r entre 0.2 y 19.9 cm^2 , para los eventos principales precedidos por dos sismos LP, el D_r osciló entre 0.2 y 12.3 cm^2 , y las señales antecedidas por tres sismos LP, el D_r varió entre 0.4 y 20.7 cm^2 , siendo este último valor, el mayor registrado durante el periodo de tiempo analizado, y corresponde a un evento sísmico ocurrido el 28 de Octubre de 2015.

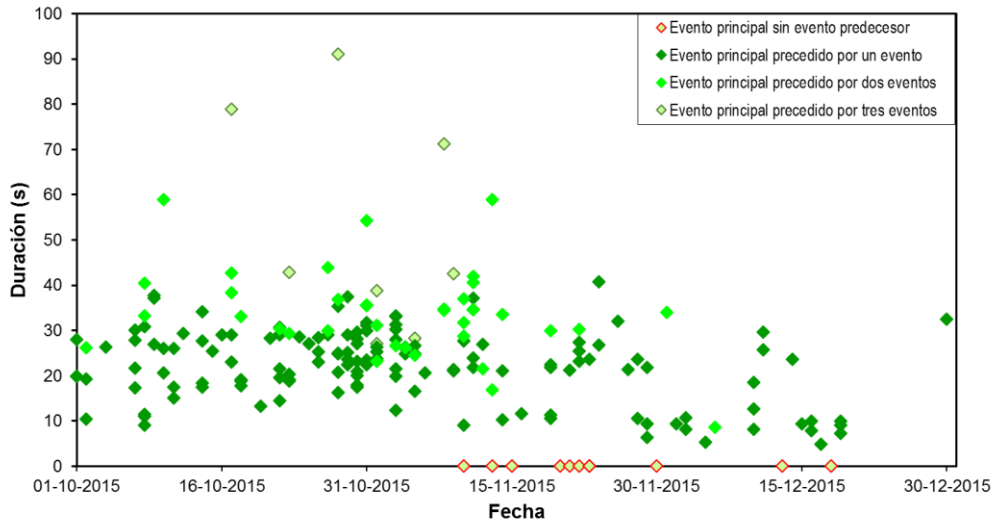


Figura 24. Gráfica de duración entre las señales sísmicas (LP + TR) de los sismos múltiples registrados durante el periodo Octubre-Diciembre de 2015 en el VNR.

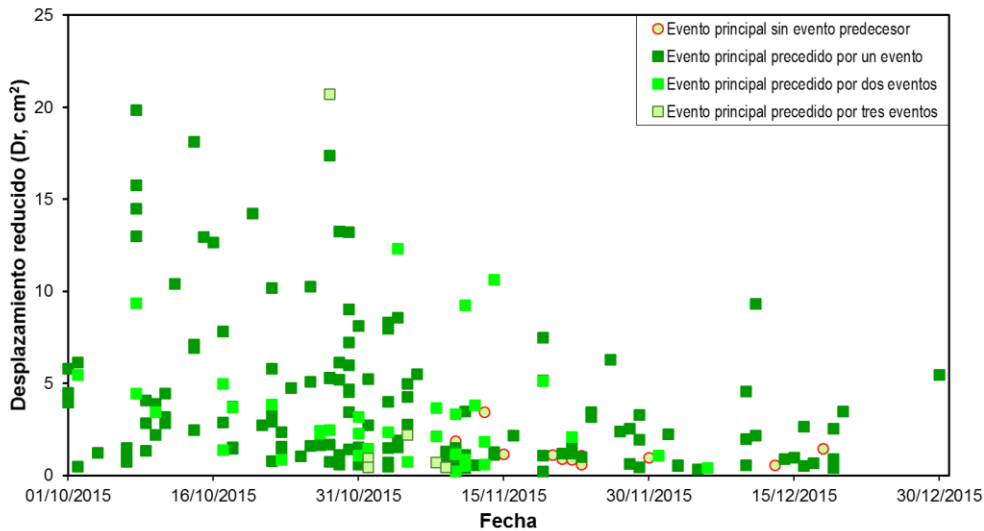


Figura 25. Gráfica del desplazamiento reducido de la señal de mayor nivel energético que constituye los sismos múltiples registrados durante los meses de Octubre a Diciembre de 2015 en el VNR. Medida tomada en la estación de OLLETA, Componente vertical.

1.2.5 Pulsos de tremor y tremor volcánico continuo (TR y TC)

El tremor volcánico ya sea en forma de pulsos o continuo es otro tipo de sismicidad asociada a la dinámica de fluidos y gases al interior de las cavidades y de los conductos volcánicos. Ya se venía registrando desde finales de Noviembre de 2014, y fue característico de la actividad sísmica durante todo el año 2015, cuando solo por periodos

de tiempo esta señal no se registró. 3582 pulsos de tremor volcánico se registraron en el VNR durante el año 2015, mostrando un aumento con respecto a los años anteriores. Los desplazamientos reducidos del tremor volcánico alcanzaron valores de hasta 35.2 cm². Estos valores en general fueron mayores a los reportados el año anterior. La Figura 26 muestra los valores de frecuencia vs desplazamiento reducido, tanto para el tremor continuo (TC -círculos azules-) como para los pulsos de tremor (TR --círculos amarillos--). Allí se puede observar que donde hay mayor concentración de altas frecuencias, los valores de Dr son bajos, esto en cuanto al tremor continuo; en cuanto a los pulsos de tremor, estos muestran una mayor concentración de frecuencias bajas y valores de Dr altos, lo que sugiere una interacción del sistema hidrotermal y el sistema magmático. Los periodos de tremor volcánico, tanto continuo como en forma de pulsos, están asociados principalmente a limpieza de conductos y emisiones de ceniza a la atmósfera.

Durante la primera mitad del año fue característico el tremor continuo (TC), mostrando aumentos y disminuciones en la amplitud, dando lugar a una especie de bandas (Figura 27). Dicho bandeado no responde en el sentido estricto del término de un tremor bandeado, ya que su distribución es irregular y no corresponde a cambios cíclicos del sistema como normalmente este término hace referencia. Las bandas observadas pueden reflejar la interacción entre el sistema magmático y el hidrotermal.

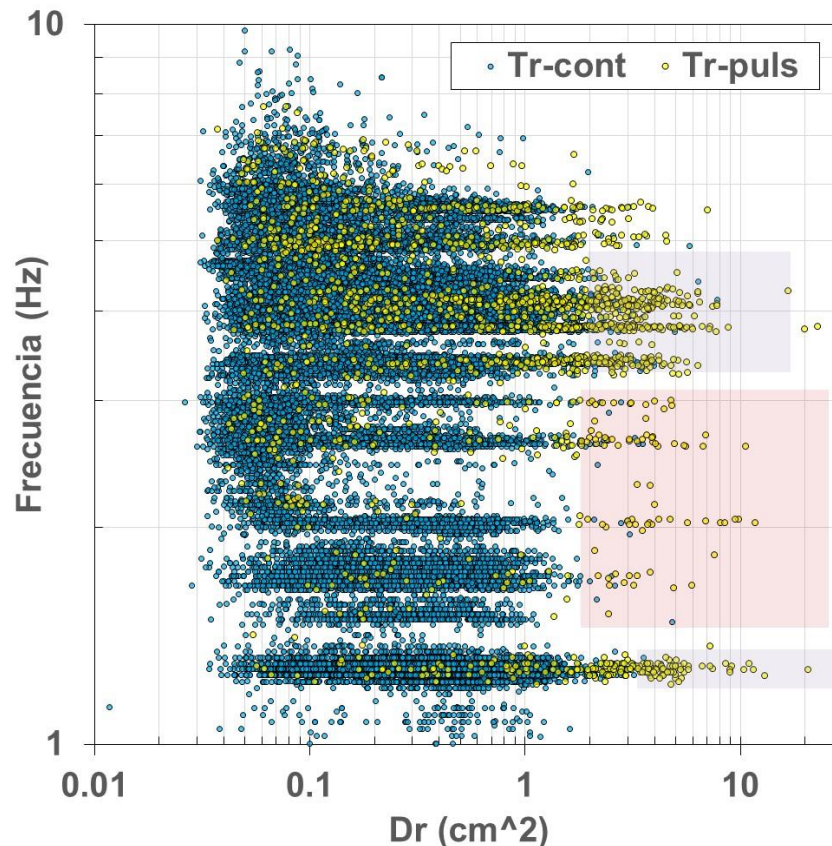
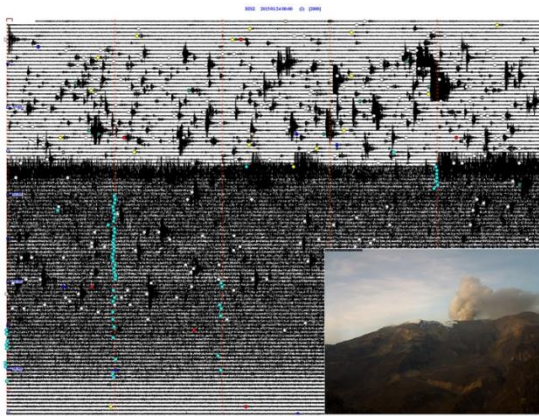
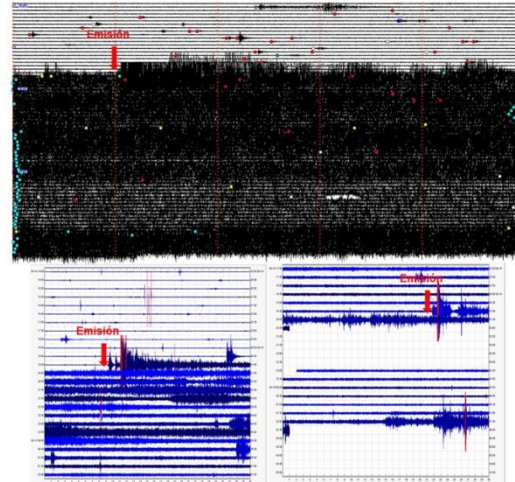


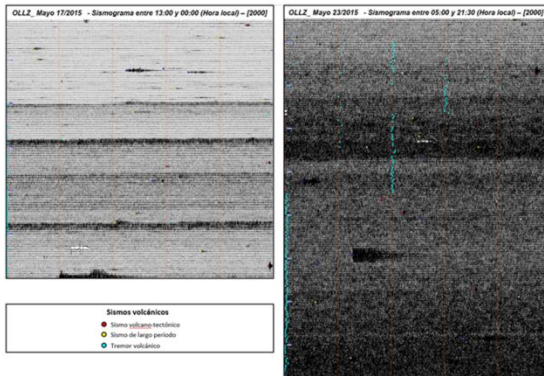
Figura 26. Valores de frecuencia y desplazamiento reducido para el tremor continuo (círculos azules) y pulsos de tremor (círculos amarillos).



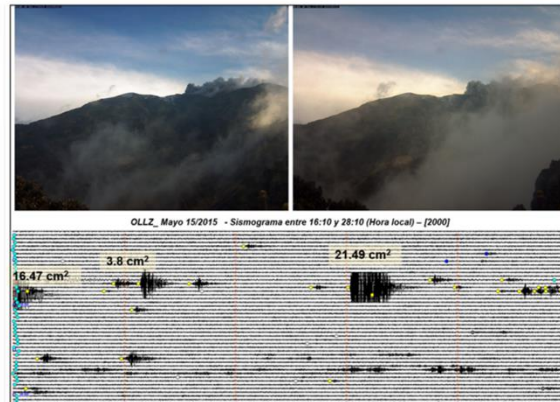
Episodio de tremor continuo del día 24 de Enero de 2015. El sismograma, desde las 00:00 hasta las 09:00, corresponde a la componente vertical de la estación de BIS. Antes del tremor se observa en el sismograma el registro de sismos de hielo, luego a las 03:22 se presenta un LP y es seguido por un pulso de tremor, y posteriormente por tremor continuo. Al amanecer se pudo observar la columna con ceniza, desde la cámara ubicada en el sector de Azufrado.



Pulsos de Tremor, registrados durante varios días del mes de Abril, Estación de Bis, componente vertical.



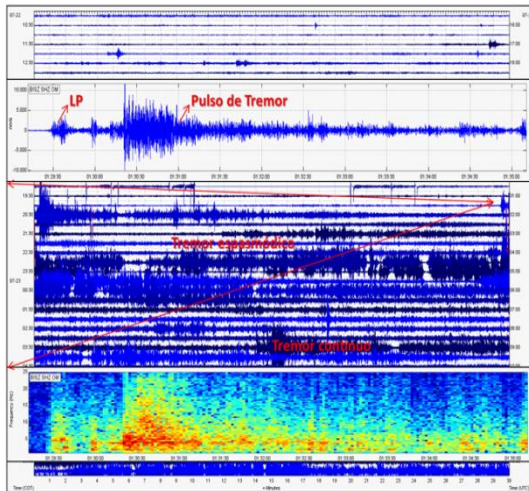
Sismogramas de registro del tremor en bandas. Registro del día 23 de Mayo (derecha) donde se aprecian cambios bruscos en la amplitud de la señal dado por TR o LP + TR al inicio del episodio y sub-episodio. Registro del día 23 de Mayo que muestra los cambios graduales en la amplitud de la señal. Estación OLLETA, componente vertical.



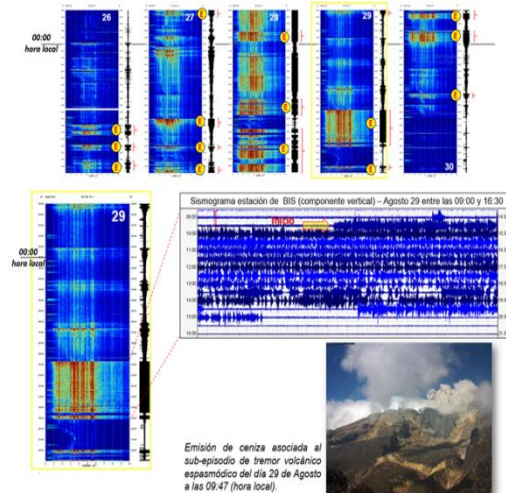
Registro y visualización en cámaras de una de las emisiones de ceniza ocurridas durante el mes de Mayo en el VNR. Componente vertical, estación BIS. b) Fotografías de la emisión de ceniza y sismogramas asociados al episodio de tremor del día 15 de Mayo de 2015.

Figura 27. Episodios destacados de tremor continuo con variaciones en su amplitud y en ocasiones bandeado, característico de la actividad del VNR entre Enero y Junio de 2015. Generalmente estos episodios de tremor estuvieron asociados a emisiones de ceniza a la atmósfera.

Entre los meses de Julio y Agosto fue común la ocurrencia de episodios de tremor espasmódico. Estos episodios se caracterizaron por ser un tipo de tremor continuo cuyo registro se prolongó entre minutos a horas y se destacó por ser el tipo de tremor continuo más energético del año, en general, alcanzando desplazamientos reducidos entre 2.0 y 7.4 cm². Este tipo de tremor tuvo frecuencias con tendencias muy marcadas entre 3.5 y 6Hz, como se puede observar en la Figura 28. El tipo de tremor espasmódico puede explicarse como un proceso de recarga magmática por el cual se pudo haber generado calentamiento rápido del agua e igualmente por la disolución de los volátiles (generados por el contacto entre el agua y el cuerpo más caliente) que finalmente entraron al sistema hidrotermal y pudieron haber generado este tipo de señales. El tremor espasmódico también estuvo asociado a procesos de emisión de ceniza.



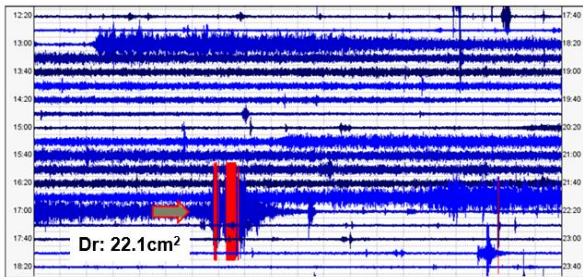
Pulso de tremor con uno de los mayores D_r registrados durante el mes de Julio en el VNR. Componente vertical, estación Bis. Forma de onda del TR registrado el 22 de Julio a las 20:30 (Hora local), duración 216 s y $D_{r\text{promedio}}$: 8.26 cm^2 ; en la parte inferior espectrograma del evento. Nótese que antes del pulso se registró un LP y posteriormente se presentó un episodio de TC y tremor espasmódico.



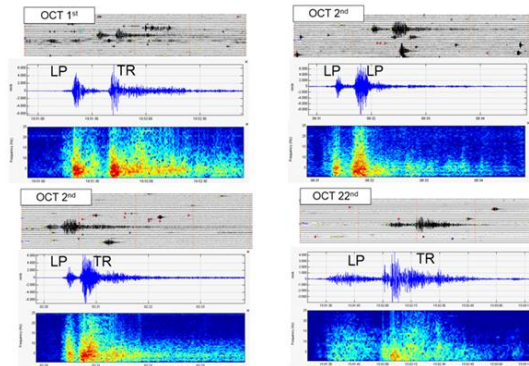
Comportamiento espasmódico de la señal de tremor continuo durante el mes de Agosto de 2015 en el VNR. Espectrogramas (arriba e izquierda) y sismograma (abajo a la derecha), estación de BIS, componente vertical. E: Sub-episodios de tremor espasmódico.

Figura 28. Episodios destacados de tremor espasmódico característico de la actividad del VNR en los meses de Julio y Agosto de 2015. Generalmente estos episodios de tremor estuvieron asociados a emisiones de ceniza a la atmósfera.

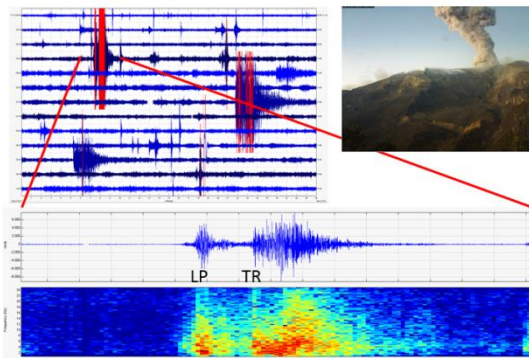
A partir del mes de Septiembre las señales de tremor volcánico se caracterizaron por presentarse en forma de pulsos de tremor (TR) de corta duración y con niveles energéticos que fueron variando, haciéndose menos energéticos con el tiempo (Figura 29). Sin embargo, aunque la señal de tremor volcánico continuo (TC) no fue tan constante en estos últimos meses, desde el 20 de Diciembre volvió a presentarse un episodio de TC que se prolongó hasta finales del año. En general, desde Septiembre, los niveles energéticos del tremor fueron bajos con respecto a meses anteriores.



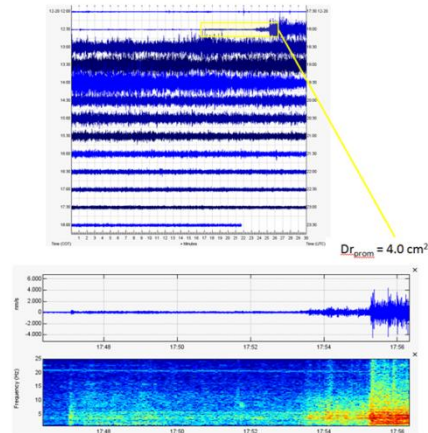
Sismograma donde se aprecia la señal sísmica registrada el día 18 de Septiembre a las 17:07 (hora local), de corta duración (80 s) con $Dr_{promedio}$: 24.25 cm^2 (parte superior). Forma de onda de la señal sísmica de TR (parte inferior). Estación BIS, componente vertical.



Sismogramas y espectrogramas de algunos sismos múltiples de fluido (tipo LP + TR o LP + LP) registrados durante el mes de Octubre en el VNR Estación OLLETA, componente vertical.



Sismograma y espectrograma del pulso de tremor volcánico de mayor nivel energético registrado durante el mes de Noviembre. Pulso de TR del día 14 de Noviembre a las 05:37 (hora local), (89 s) con $Dr_{promedio}$: 14.3 cm^2 precedido por sismo tipo LP. Estación de BIS, componente vertical. Fotografía tomada por la cámara ubicada en el sector de Azufrado.



Sismograma y espectrograma de la señal de Tremor continuo que comenzó el día 20 de Diciembre de 2015 12:47 (hora local). Estación de BIS, componente vertical.

Figura 29. Episodios destacados de pulsos de tremor antecedidos por uno o varios sismos de tipo LP. Generalmente estos episodios de tremor estuvieron asociados a emisiones de ceniza a la atmósfera. Este tipo de episodios fueron denominados posteriormente como eventos múltiples de fluidos.

Los pulsos de tremor volcánico (TR) registrados durante el año 2015 presentaron duraciones hasta 30.6 min. El episodio tremor volcánico de mayor energía se registró el día 31 de Agosto a las 03:21 (hora local) antecedido por un sismo de tipo LP y presentó una energía sísmica liberada dada por un Desplazamiento reducido (Dr) promedio de 35.2 cm^2 y una duración de 80 s (Figura 30 y Figura 31). Este evento se localizó a 0.6 km al Suroriente del cráter Arenas.

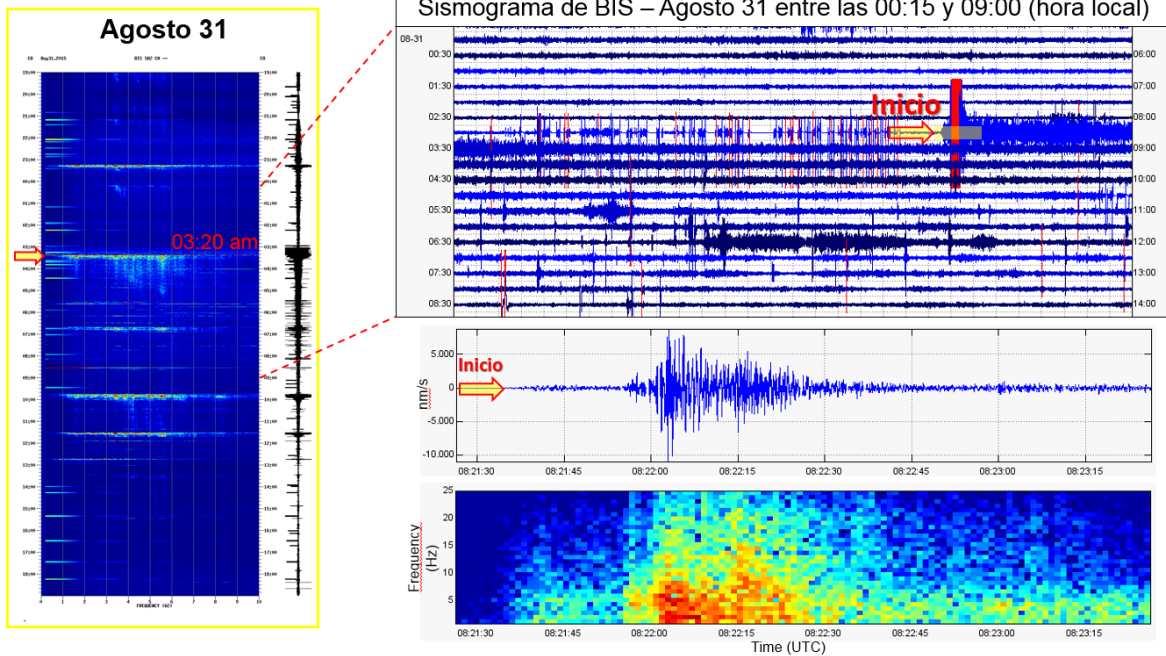


Figura 30. Pulso de temblor volcánico de mayor energía registrado en el VNR. Sismograma y espectrograma de la señal sísmica registrada el día 31 de Agosto a las 03:21 (hora local) con Drpromedio: 35.2 cm². Estación OLLETA, componente vertical.



Figura 31. Caída de ceniza asociada al pulso de temblor volcánico registrado el día 31 de Agosto a las 03:21 (hora local). Sectores en la ciudad de Manizales (recuadro izquierda). Otros sectores del departamento de Caldas (recuadro derecha).

En cuanto a los episodios de temblor volcánico continuo (TC), éstos se vienen registrando desde el 18 de Noviembre de 2014 y durante todo el año 2015. Los episodios de TC se caracterizaron por tener duraciones entre horas, días y hasta meses y por mostrar valores energéticos variables. En general presentaron valores de desplazamientos reducidos (Dr) entre 0.1 y 7.4 cm², algunos de ellos estuvieron precedidos por un evento de tipo LP de niveles energéticos importantes. Adicionalmente, mostraron frecuencias muy marcadas (1.7, 3.7, 5.8, 6.4 y 8.5 Hz) y por lo tanto más notables en las gráficas de RSAM y de SSAM (Figura 32, Figura 33 y Figura 34). En dichas gráficas se puede observar el registro de este tipo de señales durante el año 2015. En particular, el RSAM (Medida de la

amplitud sísmica en tiempo real) permite observar las amplitudes máximas asociadas a los periodos donde el tremor continuo alcanzó su máximo nivel energético (Figura 32). Nótese que las mayores amplitudes en unidades RSAM coincide con los periodos entre el 23 y el 27 de Julio, y entre el 26 y el 29 de Agosto, donde fueron más recurrentes los episodios de tremor espasmódico, siendo este tipo de tremor el más energético del año. A partir de Octubre, las amplitudes RSAM muestran niveles mucho más bajos que los registrados durante los meses previos. En la Figura 33 y Figura 34, se observan las medidas diarias de SSAM (Medida de la amplitud espectral sísmica) para cada mes del año, donde se marcan claramente los picos dominantes en frecuencia para cada episodio de tremor continuo ocurrido durante el año.

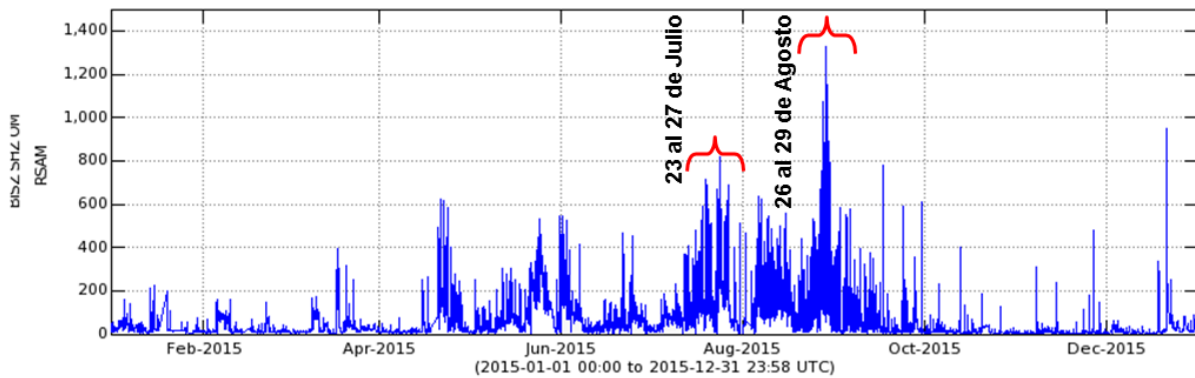


Figura 32. Gráfica de la Medida de la Amplitud Sísmica en Tiempo Real - RSAM (por sus siglas en inglés) para hacer seguimiento al registro del tremor volcánico continuo en el Volcán Nevado del Ruiz durante el 2015.

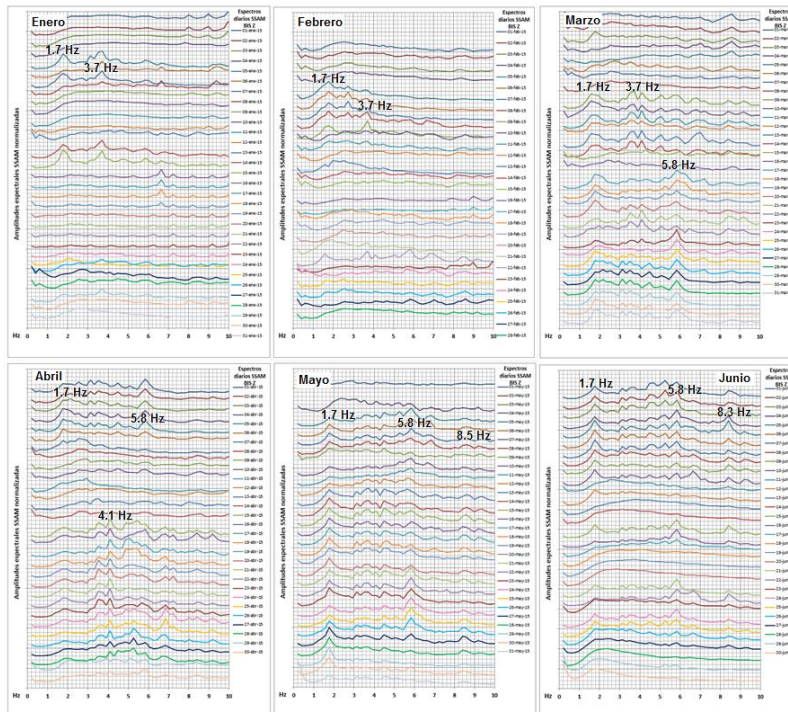


Figura 33. SSAM (Medida de la amplitud sísmica espectral), durante el primer semestre de 2015. Estación de BIS, componente vertical.

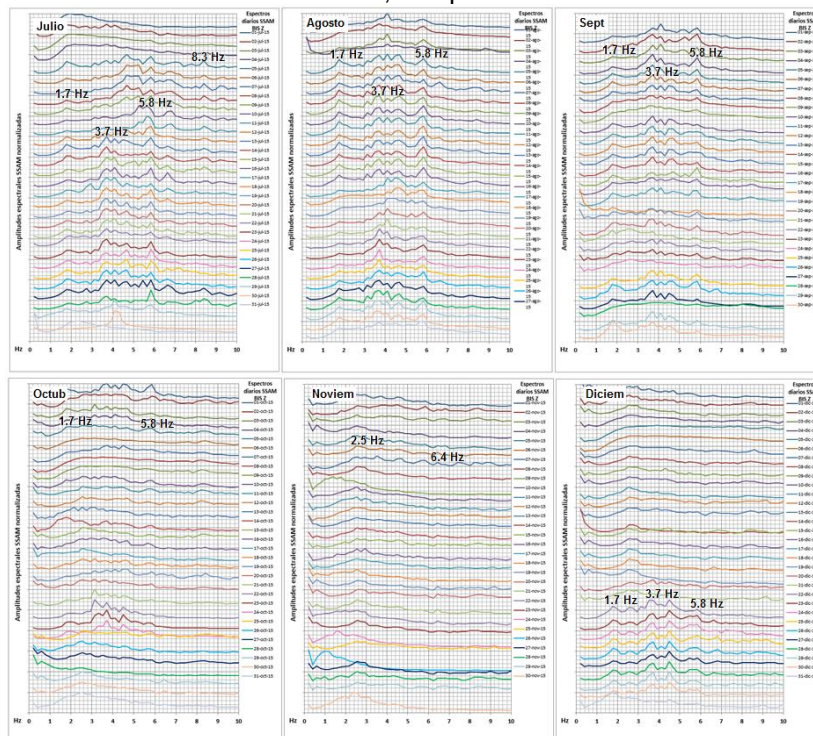


Figura 34. SSAM (Medida de la amplitud sísmica espectral), durante el segundo semestre de 2015. Estación de BIS, componente vertical.

1.2.6 Actividad superficial (la columna de gas y señales sísmicas asociadas a la actividad glacial)

Durante el año 2015 se registraron eventos relacionados con pequeñas avalanchas de rocas y/o hielo-nieve, generadas por el fenómeno de deshielo en la parte alta del volcán, así como por procesos asociados a la dinámica glacial y a remoción del material volcánico depositado, el cual puede ser movilizado por lluvias y por deshielo del casquete glacial.

La columna de gases relacionada con actividad fumarólica en el cráter Arenas tuvo una altura promedio de 830 m medidos desde la cima del cráter durante el 2015, mostrando una dirección de dispersión preferencial hacia el Noroccidente y Suroccidente y eventualmente hacia el Nororiente, Sur y Sureste. En general, la columna de gases mostró color blanco asociado a vapor de agua y, en ocasiones, tonalidades grises debido a la presencia de material particulado (ceniza volcánica), al igual que matices azules causados por las altas concentraciones de Dióxido de Azufre (SO₂). La altura máxima registrada fue de 3000 m el día 26 de Julio de 2015 (Figura 35).

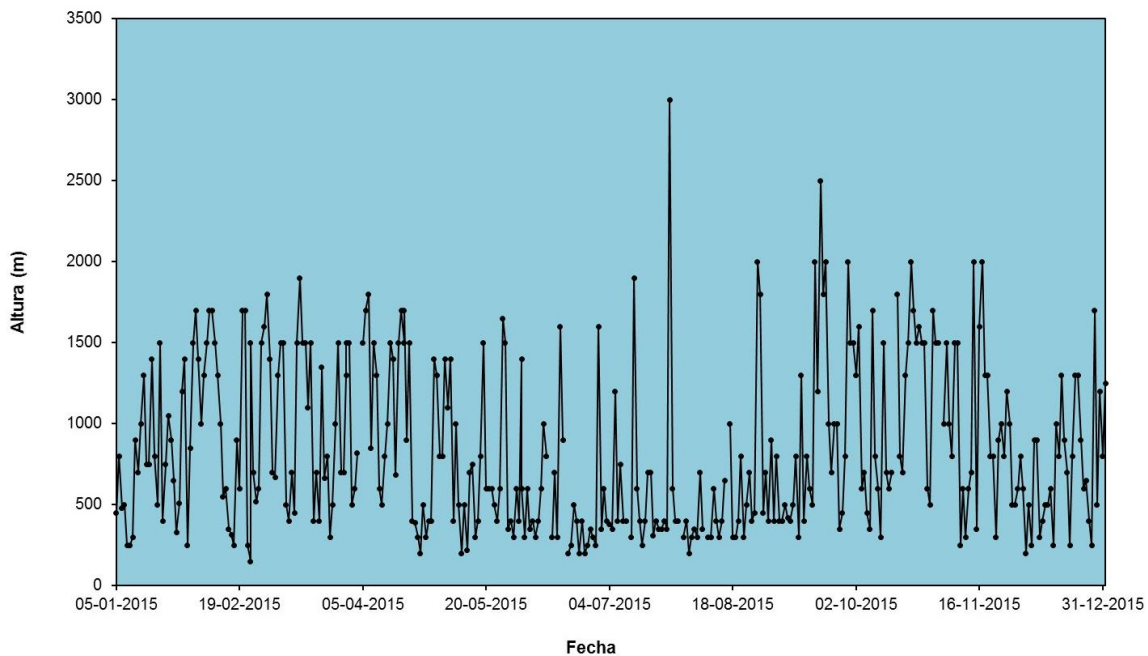


Figura 35. Altura de columna de gases y ceniza observada entre Enero-Diciembre de 2014 a partir de apreciaciones visuales desde el OVSM y de las cámaras instaladas en el área del volcán.

Los episodios de tremor generalmente estuvieron asociados a emisiones de ceniza y a alteración del sistema hidrotermal. Algunas de las emisiones de ceniza pudieron ser confirmadas a través de fotografías tomadas por las cámaras instaladas en el volcán

(Figura 36), por funcionarios del SGC en labores de campo en el área de influencia de la estructura volcánica, por funcionarios del Parque Nacional Natural los Nevados, así como imágenes satelitales captadas por el sensor OLI, acoplado al satélite Landsat8 (Figura 37). Fotografías e imágenes satelitales permitieron observar la columna de vapor, gases y ceniza, tendida la mayor parte del tiempo hacia el sector Noroccidental y Suroccidental del edificio volcánico, por acción de los vientos imperantes en la zona. Estas observaciones confirman y son evidencia en superficie de los cambios en el comportamiento de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz.

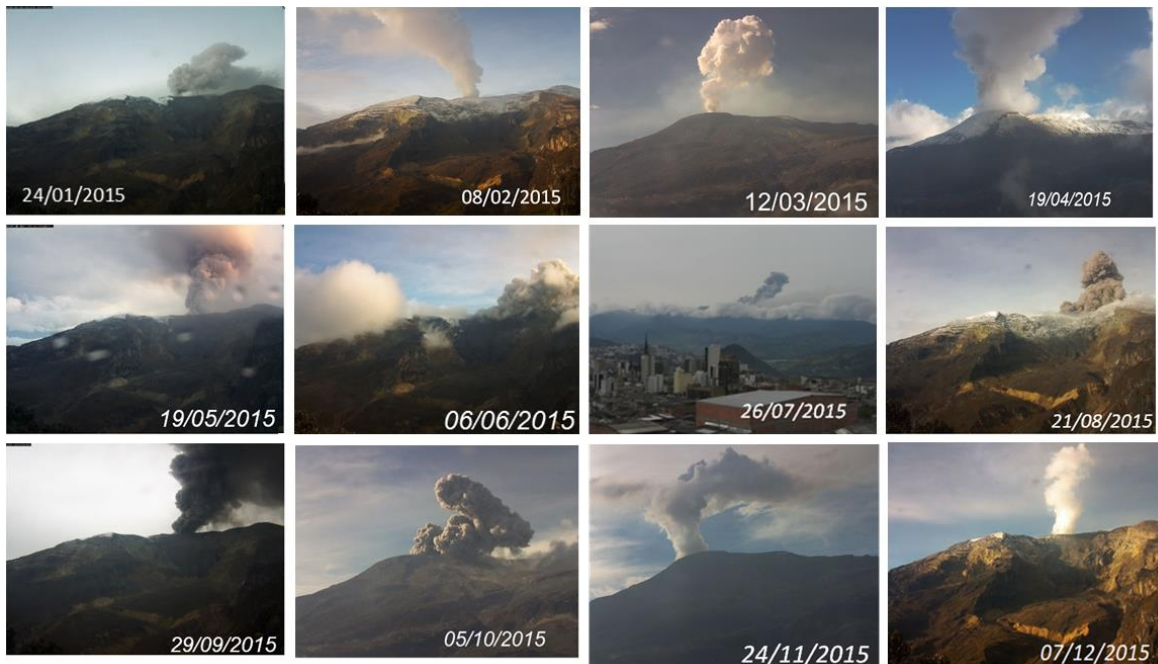


Figura 36. Columna de gases del cráter Arenas, Volcán Nevado del Ruiz. Fotografías capturadas durante el año de 2015, desde las cámaras ubicadas en inmediaciones de la estructura volcánica del VNR -Sector de Piraña - Azufrado y sector del Cerro Gualí y desde las instalaciones del OVSM.

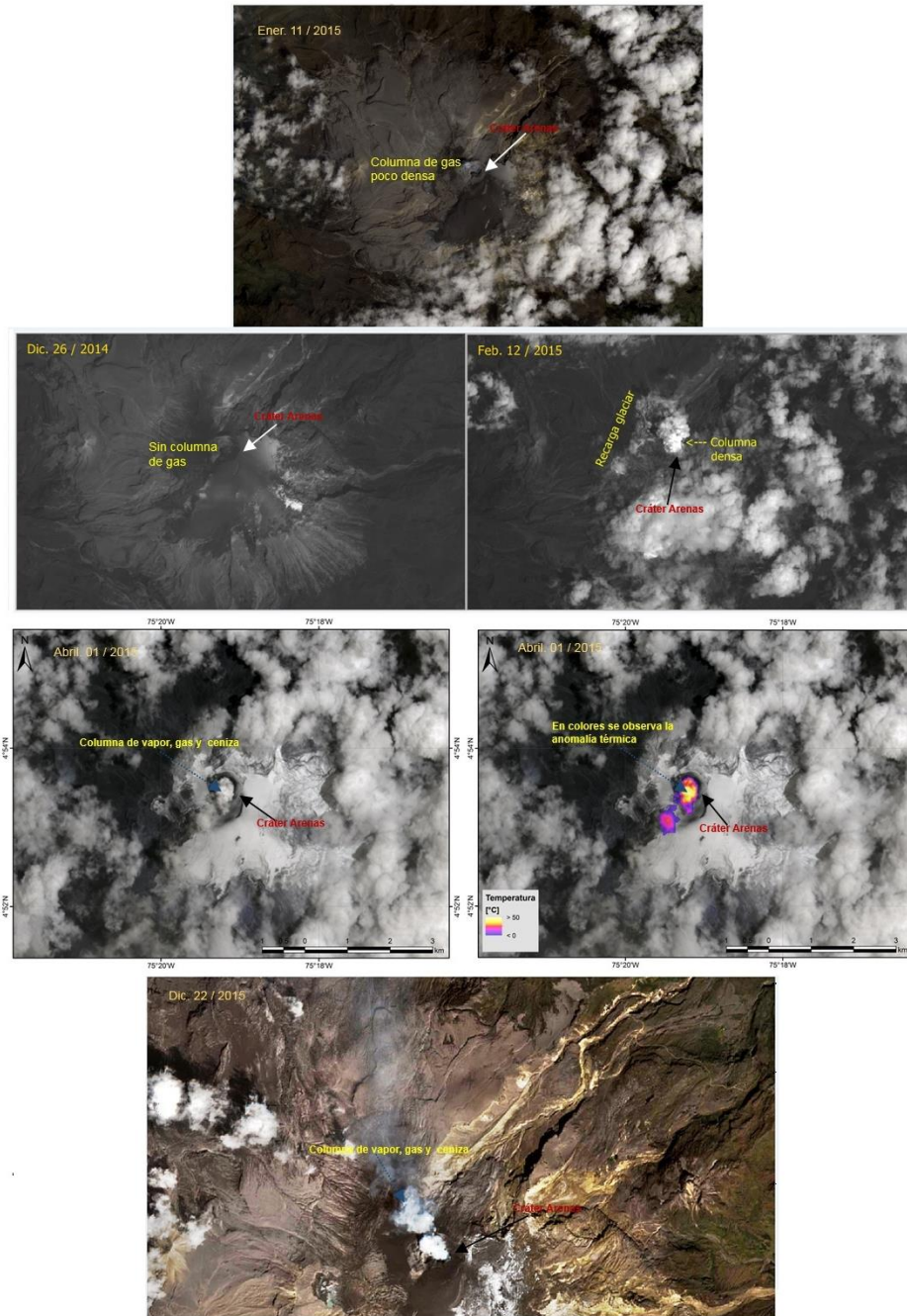


Figura 37. Imágenes ASTER del Sensor OLI-TIRS, acoplado al satélite Landsat8, captadas en diferentes días del año 2015.

Durante el año 2015 fue posible realizar el seguimiento a las anomalías térmicas (otra característica típica de volcanes activos), a partir del índice llamado Volcanic Radiative Power (VRP), medido en Vatios. Se trata de una medida del calor irradiado o emitido por un volcán, la cual puede ser estimada a través de imágenes satelitales suministradas por

diferentes agencias como por ejemplo el portal MIROVA de las universidades italianas de Turín y Florencia, en Italia. Las "alertas" se dan cuando el índice VRP supera los 1×10^6 vatios, que equivalen en temperatura a $600 \text{ }^\circ\text{K}$ ($327 \text{ }^\circ\text{C}$). Durante el año se presentaron varias anomalías térmicas importantes con valores que iban desde bajos hasta moderados, se destaca el valor reportado el día 31 de diciembre a las 01:45 a.m. (hora local), con un valor de 32 MW siendo este valor el más alto reportado durante el año (Figura 38).

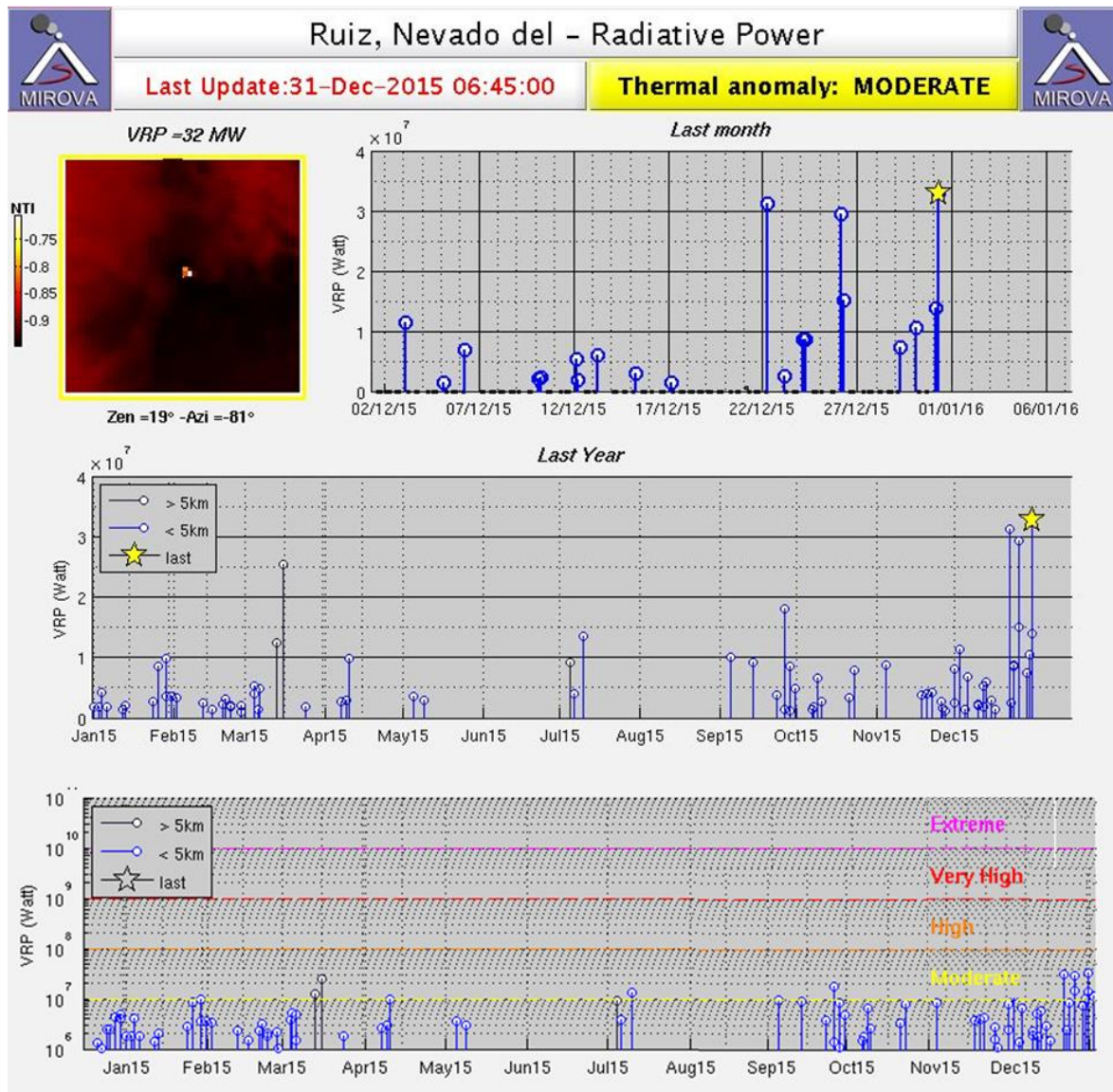


Figura 38. Anomalías térmicas registradas por el Proyecto MIROVA, en el VNR desde Enero hasta Diciembre de 2015.

1.3 DEFORMACIÓN

Durante el 2015 operaron correctamente siete estaciones GPS permanentes, así como siete inclinómetros electrónicos, ya que una estación fue retirada por mal funcionamiento. La Figura 39 muestra la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz.

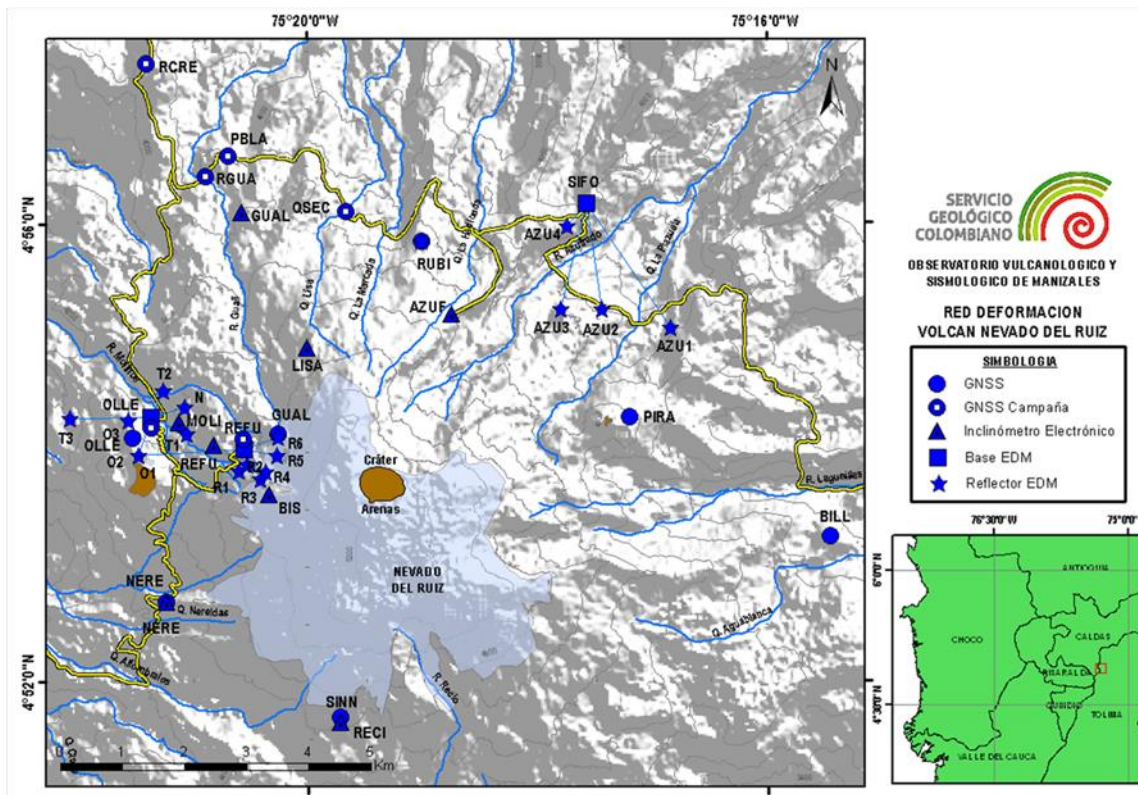


Figura 39. Red de deformación. Volcán Nevado del Ruiz.

Los datos de las estaciones GPS permanentes BLLR, GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI y SINN, al igual que la estación de referencia MZAL fueron procesados con los programas Trimble 4D Control y GAMIT-GLOBK, obteniendo las series de tiempo respectivo.

Todas las estaciones evidenciaron una correcta operación y un comportamiento en concordancia con la actividad mostrada por la estructura volcánica y sus procesos asociados (Figura 40, Figura 41 y Figura 42).

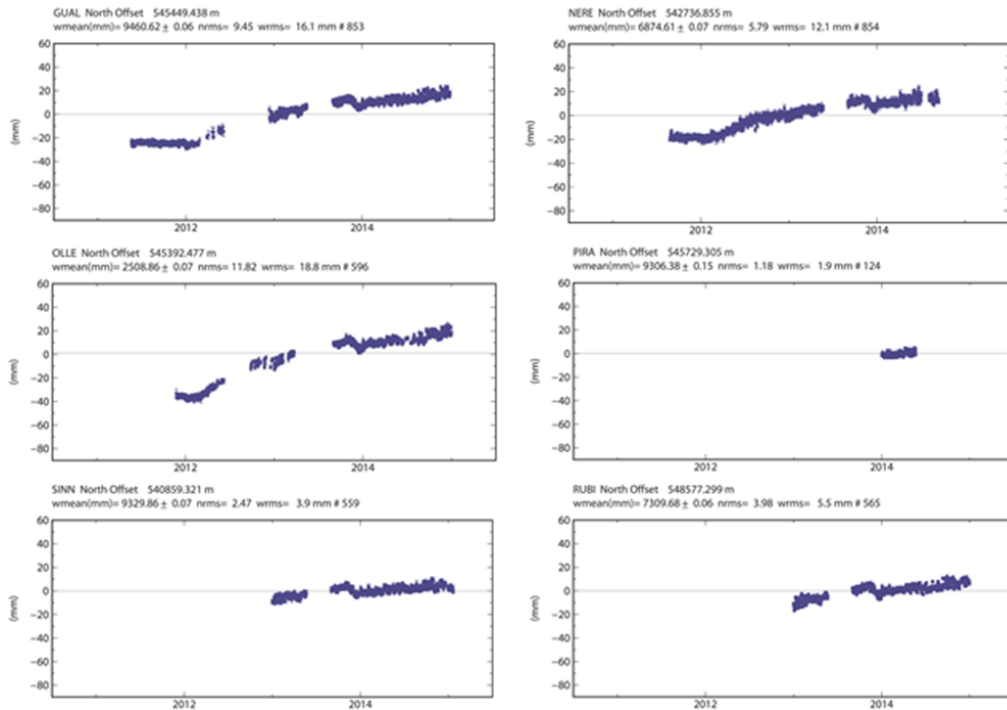


Figura 40. Series de tiempo componente Norte de las estaciones GPS GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI y SINN del VNR obtenidas con el software Gamit-Globk.

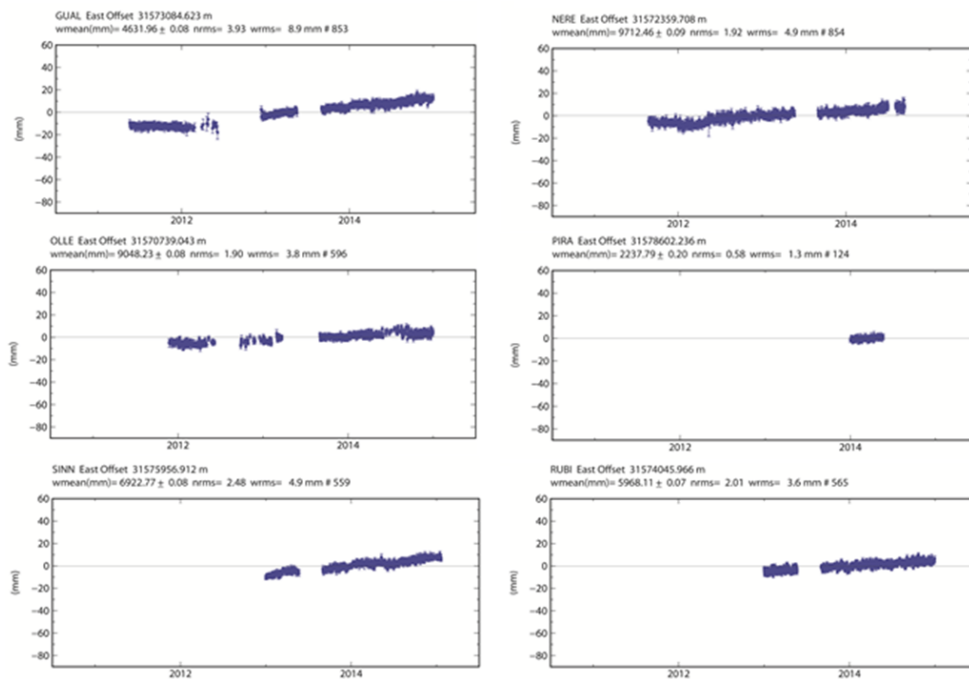


Figura 41. Series de tiempo componente Este de las estaciones GPS GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI y SINN del VNR obtenidas con el software Gamit-Globk.

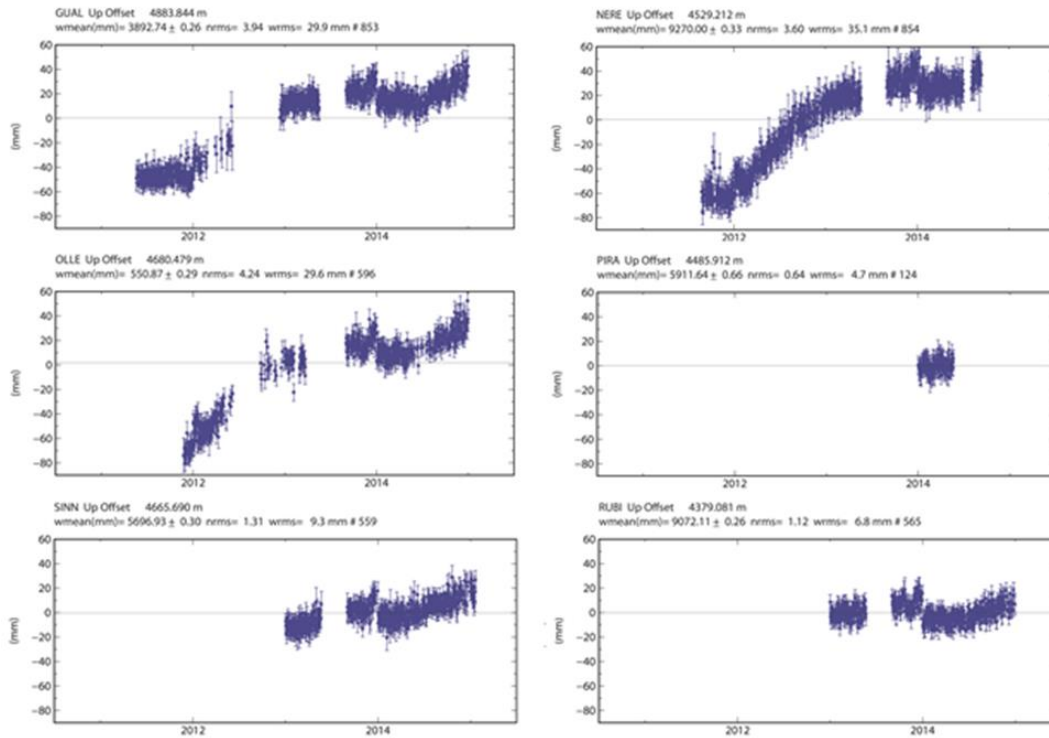


Figura 42. Series de tiempo componente Vertical de las estaciones GPS GUAL, NERE, OLLE, PIRA, RUBI y SINN del VNR obtenidas con el software Gamit-Globk.

La Figura 43 muestra el comportamiento de los inclinómetros electrónicos instalados en el Volcán Nevado del Ruiz que operaron en 2015. En general todos los inclinómetros mostraron pequeñas fluctuaciones asociadas a los cambios de temperatura, las cuales evidencian el correcto funcionamiento y operación. El inclinómetro RECI presentó algunos problemas de funcionamiento, sin embargo se recuperó su correcta operación para el II semestre de 2015.

Los inclinómetros electrónicos AZUF, LISA y GUAL no registraron cambios significativos, mostrando en general estabilidad en sus dos componentes. El comportamiento de los inclinómetros electrónicos BIS, NERE, RECI y REFU se caracterizó por registrar cambios importantes asociados al proceso deformativo del II semestre de 2015 (Figura 45a, Figura 45b, Figura 45c y Figura 45d), los cuales estuvieron relacionados con la inestabilidad del VNR y el incremento de su actividad.

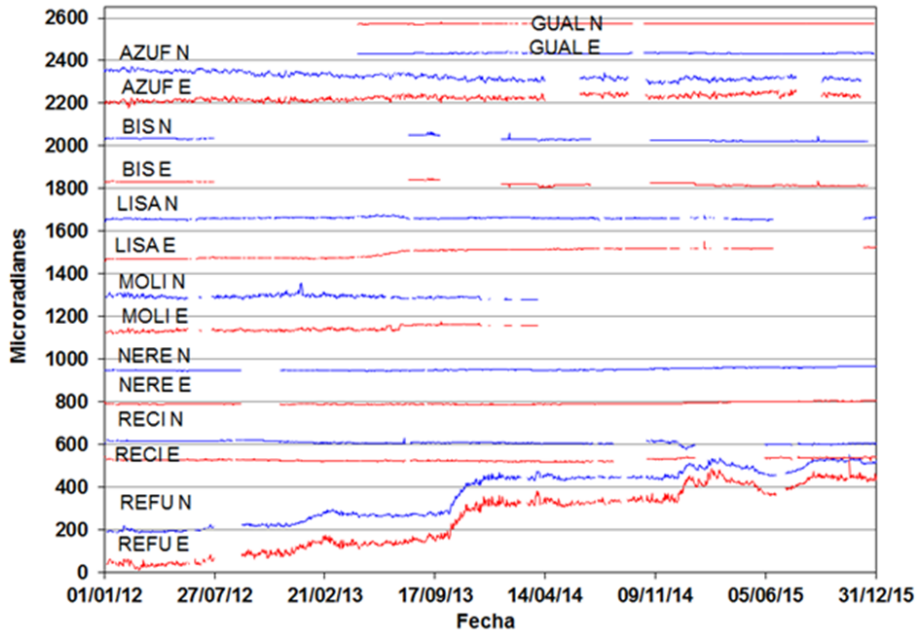


Figura 43. Comportamiento de las componentes Norte (N) (Azul) y Este (E) (Rojo) de los inclinómetros electrónicos AZUF, BIS, GUAL, LISA, MOLI, NERE, RECI y REFU de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz desde Enero de 2012 hasta Diciembre de 2015.

Adicionalmente a partir de imágenes satelitales e interferogramas proporcionados por el Dr. Sergey V. Samsonov y Paul Lundgren, del Canadá Centre for Mapping and Earth Observation Natural Resources y del Jet Propulsion Laboratory (NASA), respectivamente fue posible continuar con el monitoreo utilizando esta técnica (Figura 44).

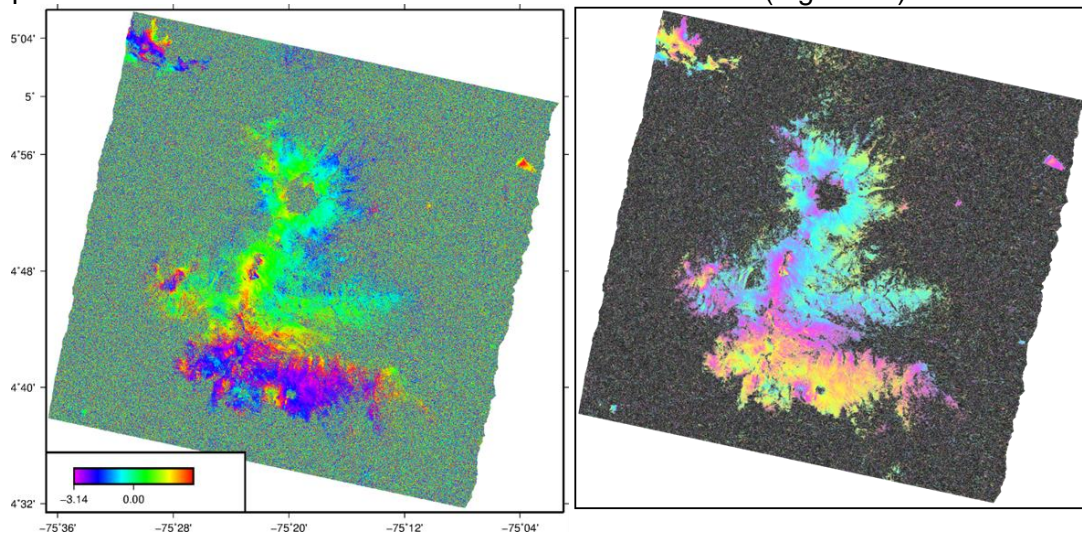


Figura 44. Interferograma asociado con la deformación presentada en el sector del Volcán Nevado del Ruiz entre Septiembre de 2014 y Agosto de 2015. Cortesía los Drs. Sergey Sansonov y Paul Lundgren del Canadá Centre for Mapping and Earth Observation Natural Resources y del Jet Propulsion Laboratory (NASA).

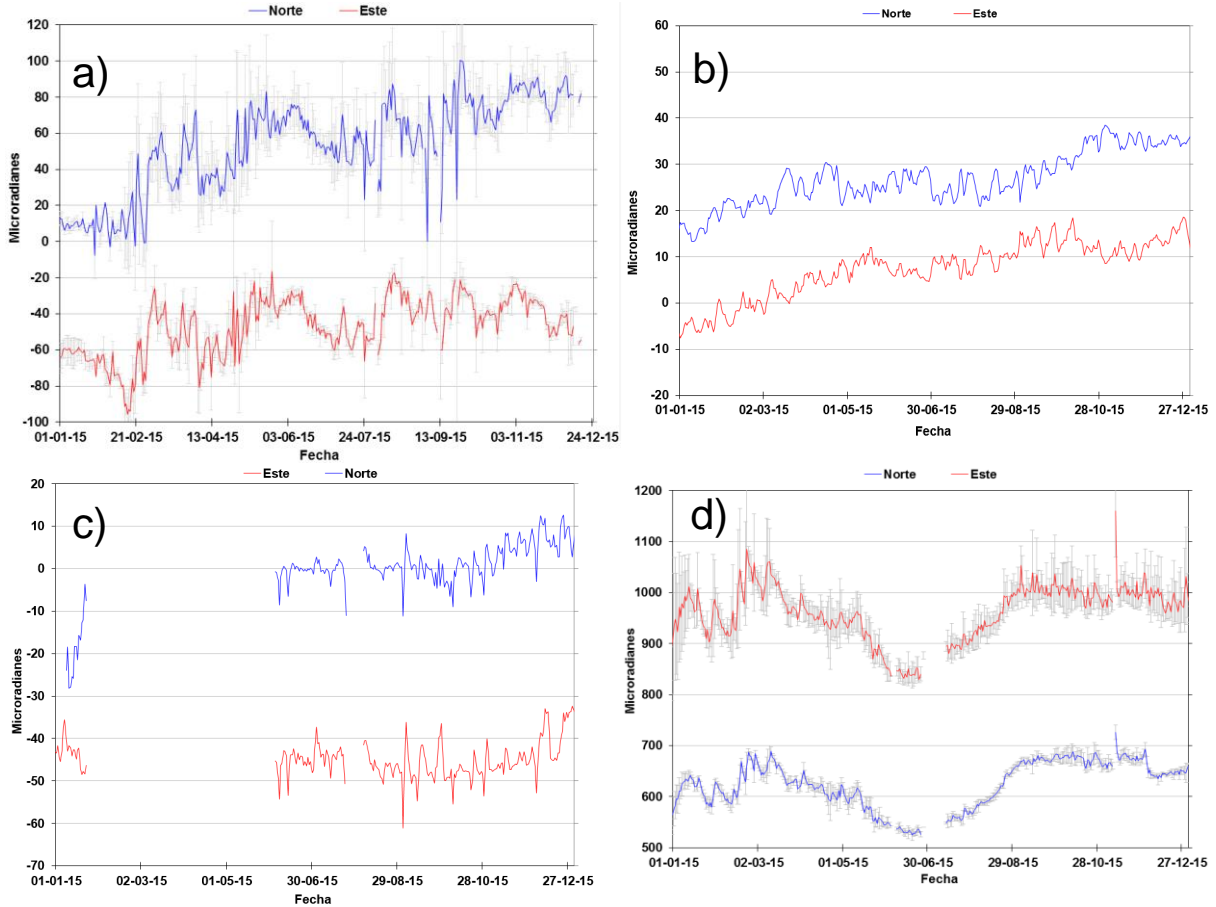


Figura 45. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Rojo) de los inclinómetros electrónicos BIS (a), NERE (b), RECI (c) y REFU (d) de la red de deformación del Volcán Nevado del Ruiz durante 2015.

Durante 2015 se ocupó la base EDM (Medición Electrónica de Distancias) REFUGIO, la cual viene registró un cambio deflacionario importante al inicio del año, sin embargo no se pudieron realizar mediciones adicionales debido a las continua emisiones de ceniza que cubrieron los reflectores EDM (Figura 46).

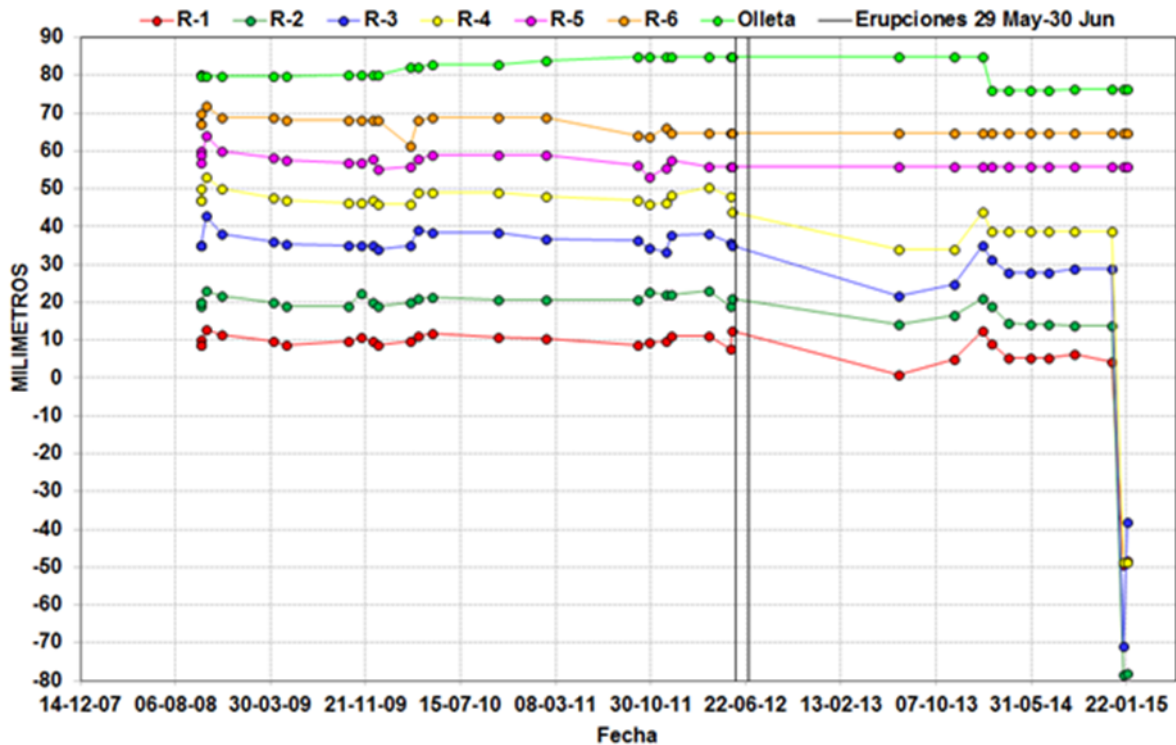


Figura 46. Comportamiento de la base EDM REFUGIO y los reflectores R-1, R-2, R-3, R-4, R-5, R-6 y Olleta, de la red de deformación del VNR hasta diciembre de 2015.

1.4 GEOQUÍMICA

Durante el año 2015 el grupo de Geoquímica del SGC-OVSM realizó muestreos, análisis in situ y en el laboratorio de los nacimientos termales HOTEL, AGUAS CALIENTES, BOTERO LONDOÑO y NEREIDAS, también se realizó monitoreo permanente de las estaciones de Gas Radón ALFOMBRALES, OLLETA, GUALI y AZUFRADO, al igual que el cálculo y análisis de emisiones de SO₂ registradas en las estaciones telemétricas SCAN DOAS: BRUMA/OLLETA, ALFOMBRALES y AZUFRADO, también se realizó mediciones de SO₂ con equipo Mobile DOAS. En la Figura 47 se presenta el mapa con las estaciones de monitoreo geoquímico en el VNR.

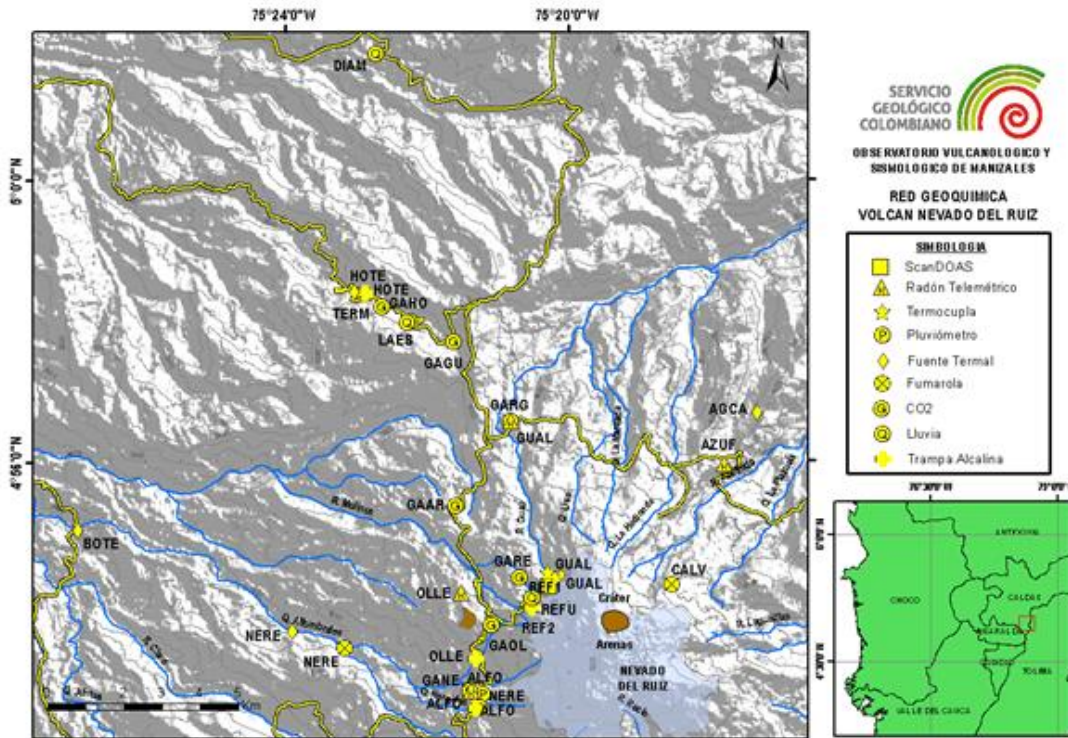


Figura 47. Red Geoquímica. Volcán Nevado del Ruiz.

1.4.1 Emisiones de SO₂ en Estaciones DOAS.

Durante el año 2015 se contó con el funcionamiento permanente de la estación SCAN DOAS ALFOMBRALES, la estación AZUFRADEO estuvo operativa solo hasta el mes de Abril, la estación BRUMA funcionó de manera intermitente, su correcto funcionamiento se logró hasta mediados del mes de Agosto y tuvo que ser reubicada en un nuevo sitio que se denominó OLLETA, esta reubicación se realizó debido a la constante caída de ceniza que afectó tanto la telemetría como el escáner del SCAN DOAS (Figura 48).



Figura 48. Fotografías de la constante emisión de ceniza del VNR que afectó el funcionamiento del equipo SCAN DOAS y la telemetría de la Estación BRUMA (Junio de 2015).

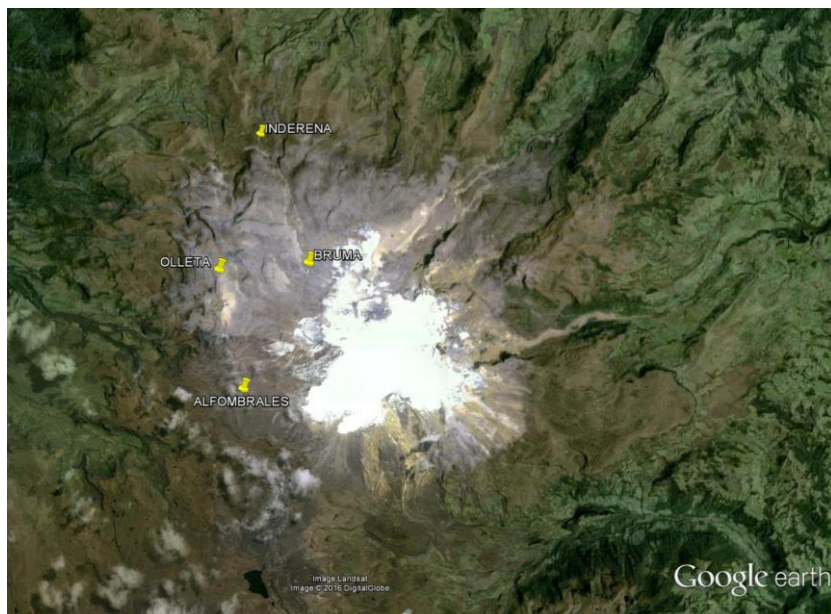


Figura 49. Mapa de Ubicación de las Estaciones SCAN DOAS que operaron en el 2015. Volcán Nevado del Ruiz.

Durante el año 2015 las medidas de los flujos de SO₂ provenientes de las descargas del VNR presentaron fluctuaciones durante todo el año, los flujos promedios estuvieron entre las 1000 y 3000 T/d. Se cuantificaron flujos máximos por encima de las 10000 T/d. Siendo el mes de Septiembre el que presentó el mayor incremento en la desgasificación, alcanzando flujos de 32000 T/d, este flujo se registró en la estación ALFOMBRALES. A continuación en la Tabla 6 se aprecian las medias de los flujos máximos y promedios registrados durante el año 2015.

Tabla 6. Flujos de SO₂ estimados de las estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz.

Mes	Media de los Flujos Promedios SO ₂ (T/d)	Media de los Flujos Máximos SO ₂ (T/d)	Flujos Máximos SO ₂ (T/d)
Enero	2676	6580	16823
Febrero	1252	3980	11229
Marzo	973	3453	12193
Abril	2308	6318	16671
Mayo	3210	7939	17700
Junio	1367	3783	15914
Julio	2713	7327	22494
Agosto	2894	7837	17600
Septiembre	3204	10827	32358
Octubre	1902	4784	15596
Noviembre	1293	3710	9795
Diciembre	1477	3734	9042

De acuerdo a las mediciones realizadas en el 2015, las descargas de SO₂ provenientes del VNR se han mantenido estables en magnitud respecto a los años anteriores, en la Figura 50 se aprecia como en el 2012 los flujos de SO₂ alcanzaron valores por encima de las 30000 T/d, para el año 2013 se observa un decrecimiento y los máximos no superaron las 25000 T/d, en el año 2014 y 2015 los valores máximos son mucho menores respecto al 2012 y 2013, no obstante en el 2015 se estimaron flujos por encima de las 25000 T/d. Algunas de las emisiones de ceniza y eventos de tremor se presentan junto a la desgasificación en la Figura 50.

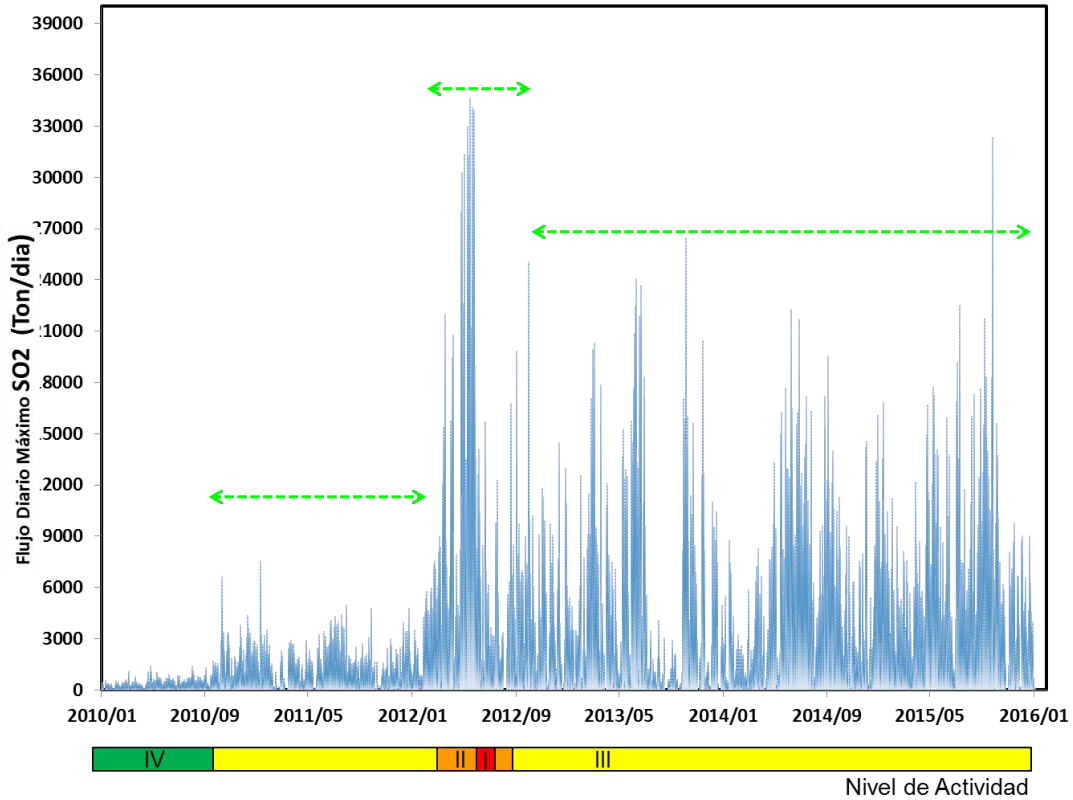


Figura 50. Flujos Máximos de SO₂ estimados en el Volcán Nevado del Ruiz entre los años 2010-2015.

En la Figura 51 se aprecia el comportamiento con el tiempo los promedios y máximos de SO₂ registrados en las estaciones SCAN DOAS ubicadas en el VNR durante el 2015. Se evidencian fluctuaciones durante todo el año, no obstante entre los meses de Junio a Septiembre se presentan los mayores flujos de SO₂, los cuales alcanzaron máximos por encima de las 15000 T/d.

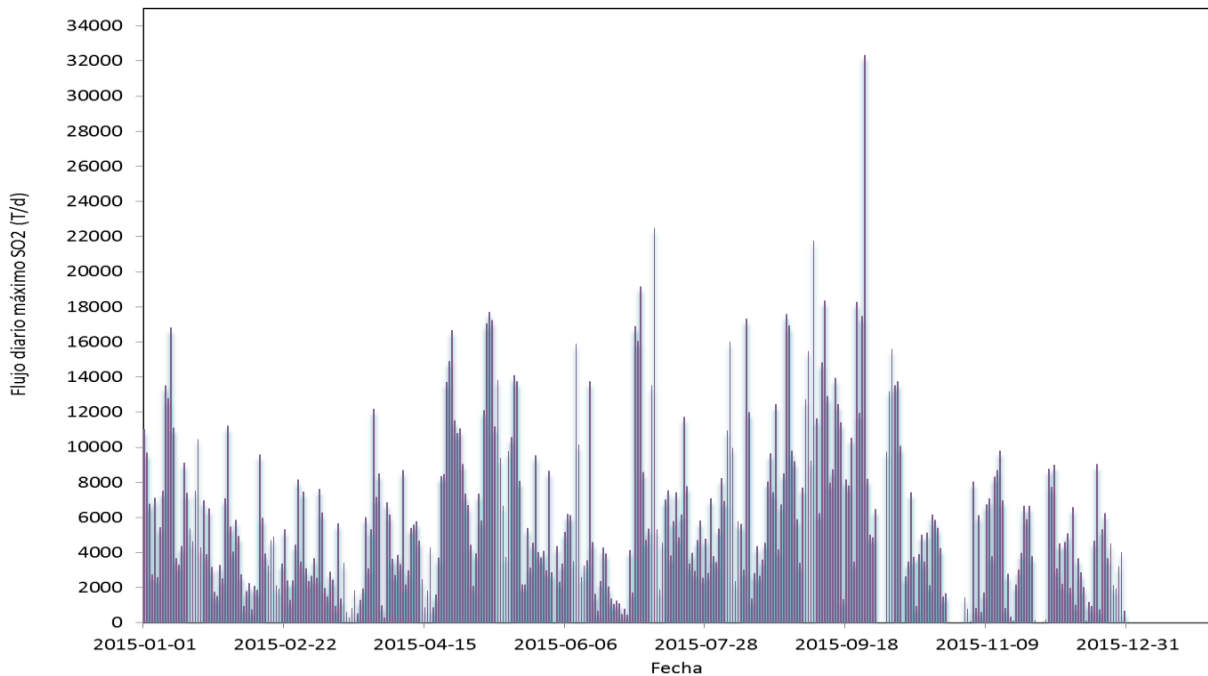
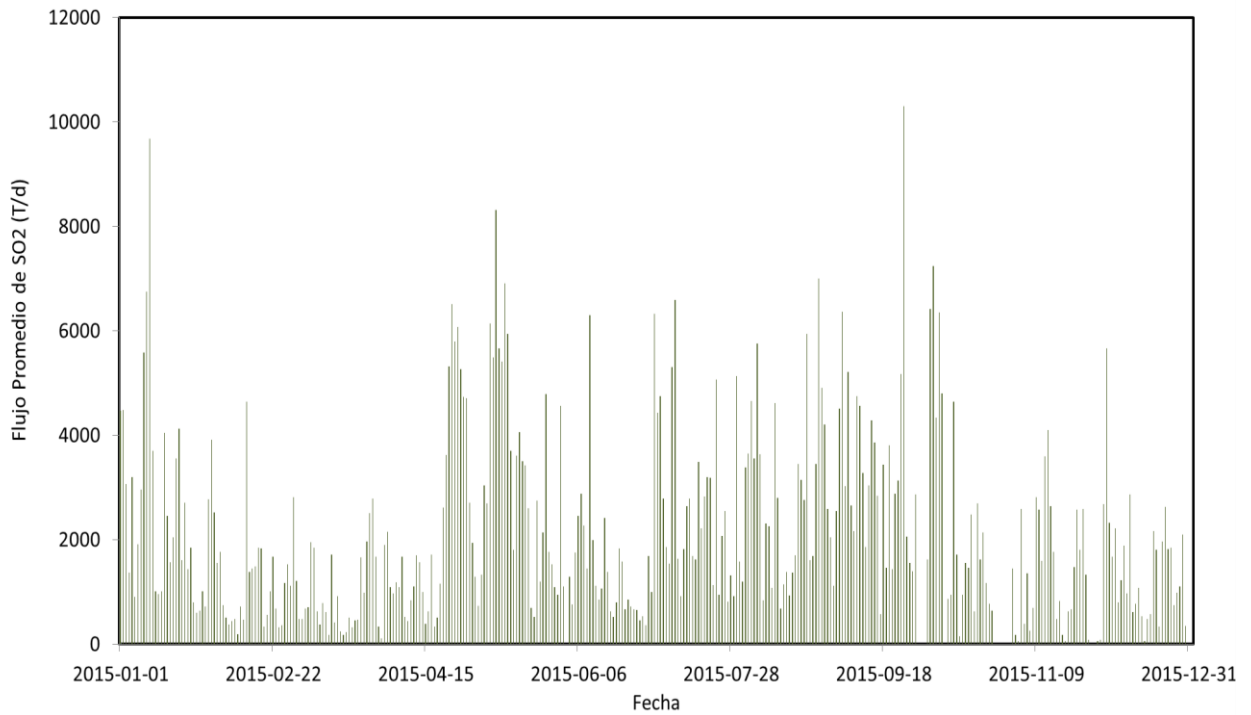


Figura 51. Flujos de SO₂: Promedio y Máximo estimado desde estaciones SCAN DOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

Las descargas de SO₂ acumuladas desde Enero de 2012 hasta Diciembre de 2015 se presentan en la Figura 52. En la gráfica se observa que la pendiente de la curva en el

año 2015 no presentó incrementos importantes, las descargas de SO₂ emitidas a la atmósfera se mantienen constantes aunque continúan siendo altas.

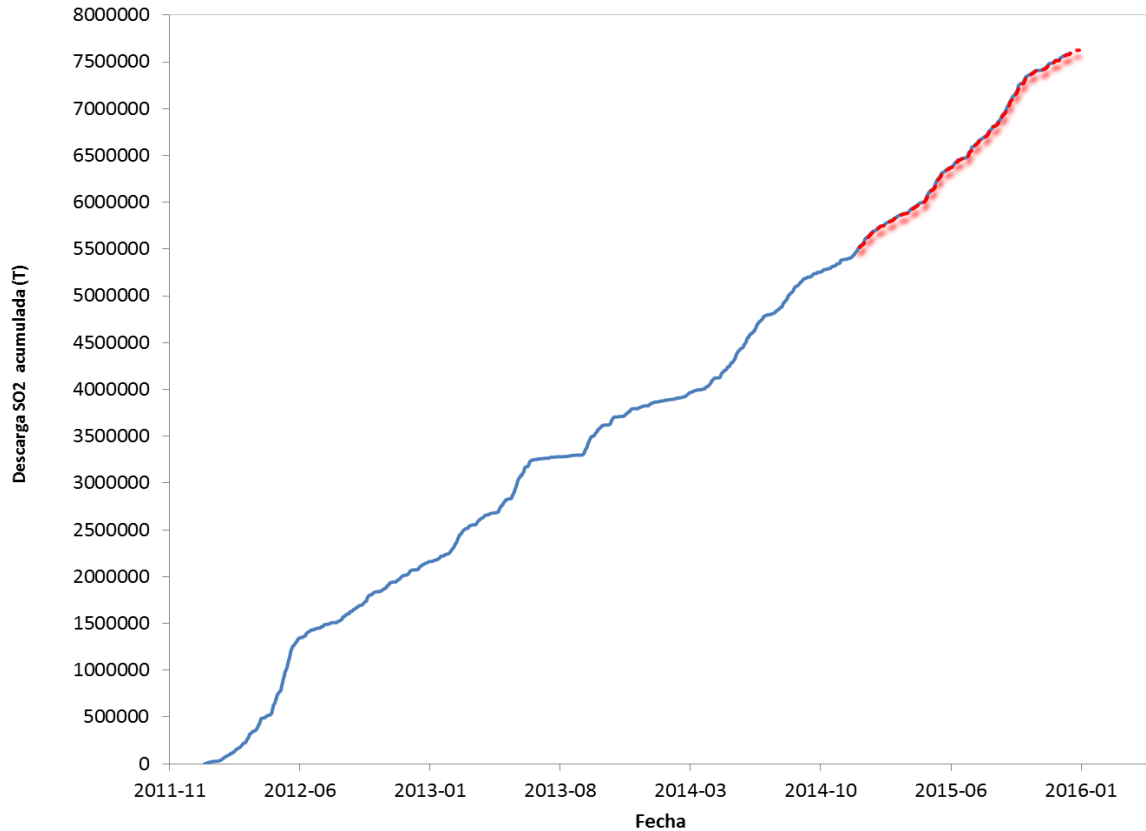


Figura 52. Descarga de SO₂ acumulada a 2012-2015. Volcán Nevado del Ruiz.

A continuación se presentan gráficas independientes para observar la descarga de SO₂ emitida a la atmósfera por el Volcán Nevado del Ruiz. Se aprecia en la Figura 53 que en los años 2010 y 2011 las descargas de SO₂ estuvieron por debajo de las 500.000 T de SO₂, luego de la etapa eruptiva del 2012 el SO₂ emitido a la atmósfera se incrementó considerablemente alcanzando las 2.000.000 T, desde el inicio de la etapa eruptiva en el Volcán Nevado del Ruiz en el 2012 y hasta el año 2015, las descargas de SO₂ emitidas a la atmósfera se mantienen en niveles altos (mayores a 1.500.000 T), lo cual ha permitido establecer que el sistema volcánico continúa inestable y en evolución.

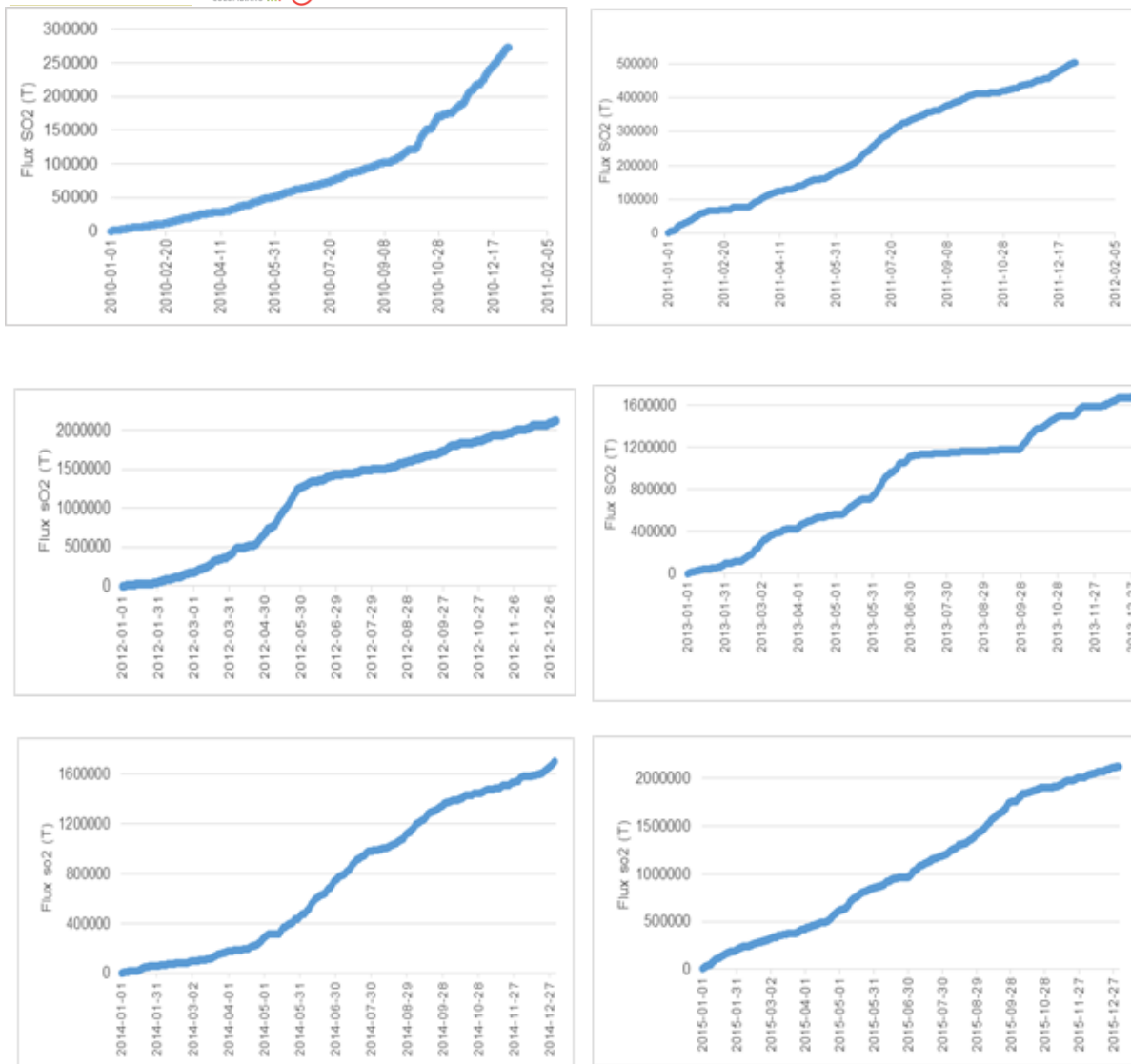


Figura 53. Descarga de SO₂ emitida a la atmósfera 2010 a 2015. Volcán Nevado del Ruiz.

Los cálculos de flujo de SO₂ se realizaron teniendo en cuenta las condiciones de viento (dirección y velocidad) que genera el IDEAM mediante el modelo WRF. En la Figura 54 se aprecia las gráficas de frecuencia de la velocidad y dirección del viento predominantes para el año 2015. La dirección predominante del viento fluctuó entre Suroccidente y Noroccidente, favoreciendo los escaneos de las estaciones BRUMA/OLLETA y ALFOMBRALES.

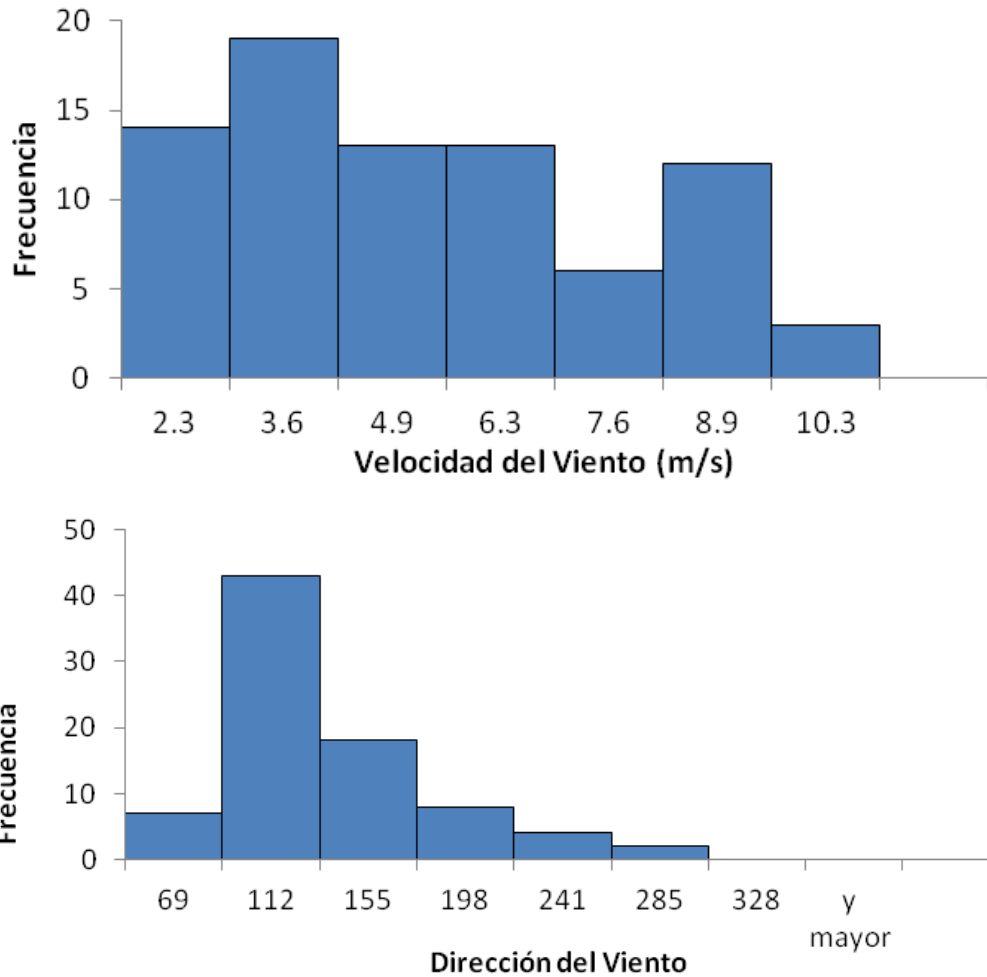


Figura 54. Frecuencia de la Velocidad y Dirección del Viento predominantes para el año 2015.

Las descargas de SO_2 originadas en el Volcán Nevado del Ruiz también se observaron en imágenes satelitales durante todo el 2015. En la Figura 55 se aprecian algunas imágenes satelitales SuomiNPP/MOPS y NESDIS (ozone mapping profile suite) generadas por la NASA que evidencian una constante desgasificación del VNR, en las imágenes se aprecia la descarga de SO_2 y la dispersión de la misma de acuerdo al régimen de vientos dominante.

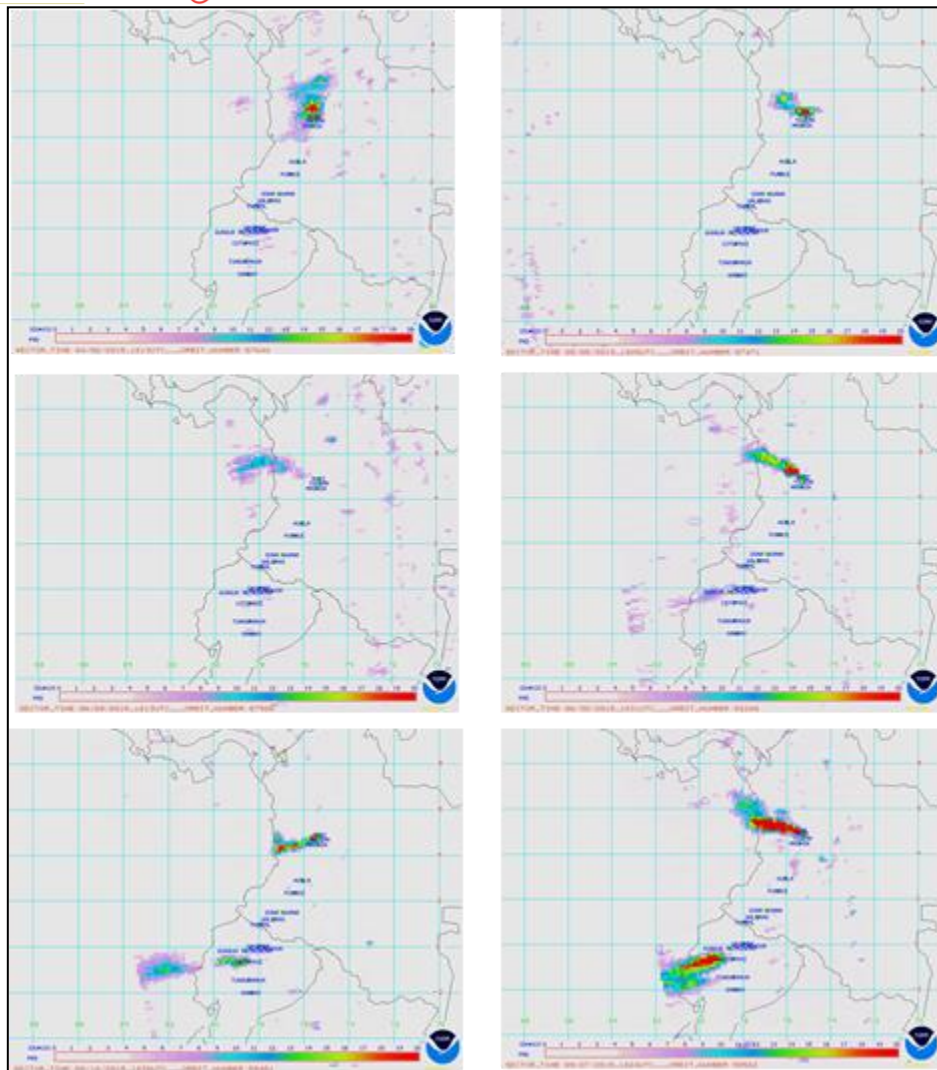


Figura 55. Imágenes OMI que muestran la desgasificación SO_2 en el Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

1.4.2 Medidas Móviles de SO_2

En el 2015 se realizaron de manera periódica medidas móviles para estimar los niveles de desgasificación del VNR con el equipo MobileDOAS, en la Tabla 7 se presentan las rutas y datos de viento usados por el cálculo del flujo de SO_2 . Los flujos medidos durante el año corroboran la constante desgasificación del volcán. En promedio los flujos medidos estuvieron por encima de las 4500 T/d. En la Figura 56 se aprecia el comportamiento con el tiempo de los flujos medidos con sistema móvil, allí se aprecia que en el 2015 no se estimaron altos flujos de SO_2 con el sistema móvil, no obstante el volcán mantuvo su nivel de actividad, registrándose eventos de ceniza mayores. Los valores estimados en el 2015 fueron inferiores respecto a los medidos en el 2014, lo cual está relacionado con el nivel

de actividad presentado por el VNR en el 2015.

Tabla 7. Parámetros de viento y rutas usadas para medidas móviles de SO₂. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

FECHA	Punto Inicial	Punto Final	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (grados)	Flujo máximo calculado (T/d)
2015-01-22	Esperanza	Camino español	5	91,28	5228
2015-01-30	Nereidas	Brisas	7	150	6421
2015-05-15	Chalet	Olleta	7,2	118	1868
2015-06-05	Esperanza	Alfombrales	6	130	4689
2015-06-11	Esperanza	Alfombrales	7	129	5278
2015-06-12	Esperanza	Alfombrales	4	111	4313
2015-06-12	Olleta	Gualí	4	110	10097
2015-12-09	Tumbas	Camino español	6	115	1275
2015-12-11	Esperanza	Alfombrales	7	90	3160

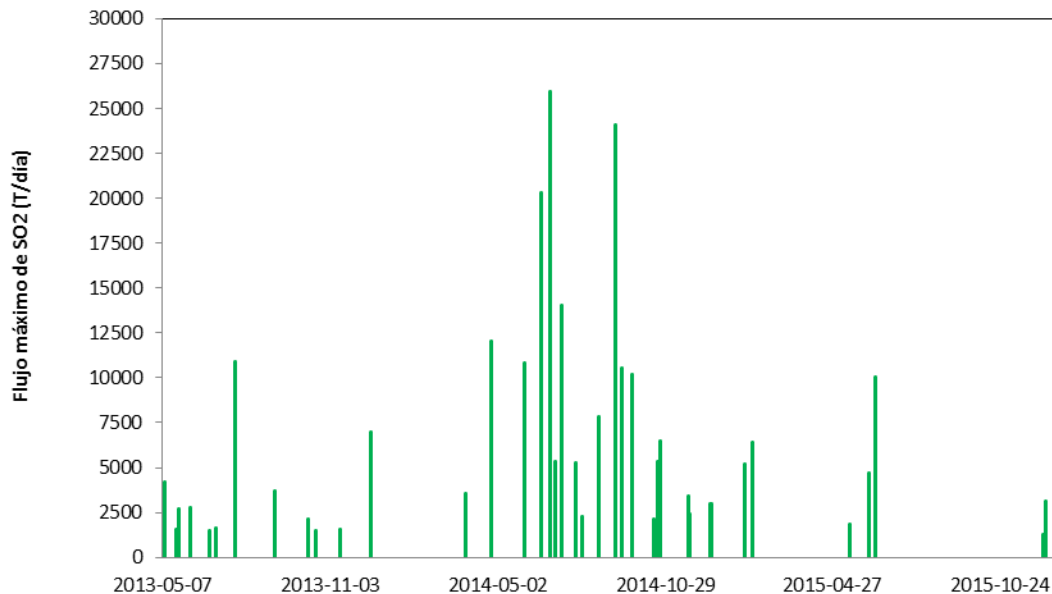


Figura 56. Flujos de SO₂ estimados con equipo MobileDOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

A continuación se presenta el mapa con la ruta más frecuente que se toma para realizar las medidas del flujo de SO₂, allí se muestra que la concentración de la pluma (color rojo) se presenta en dirección hacia el Occidente del VNR. (Esta dirección es predominante durante todo el año).



Figura 57. Rutas frecuentes para medida de SO₂ con equipo MobileDOAS. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

1.4.3 Emisiones de Gas Radón

Durante el año 2015 se monitorearon las estaciones telemétricas: GUALI, OLLETA, ALFOMBRALES y AZUFRAO. Los resultados del monitoreo muestran que se presentaron algunas variaciones en la concentración de Radón en suelo especialmente entre los meses de Mayo y Julio para todas las estaciones, los incrementos que se registraron en la concentración de gas radón pueden estar relacionados con la sismicidad volcano-tectónica registrada en el VNR durante estos meses. Todas las estaciones registraron concentraciones de radón en diferentes magnitudes, las estaciones GUALI y ALFOMBRALES mostraron niveles por debajo de los 5000 Beq/m³. La mayor desgasificación en radón la presentó la estación OLLETA con un registro promedio de 10000 Beq/m³ (Figura 58).

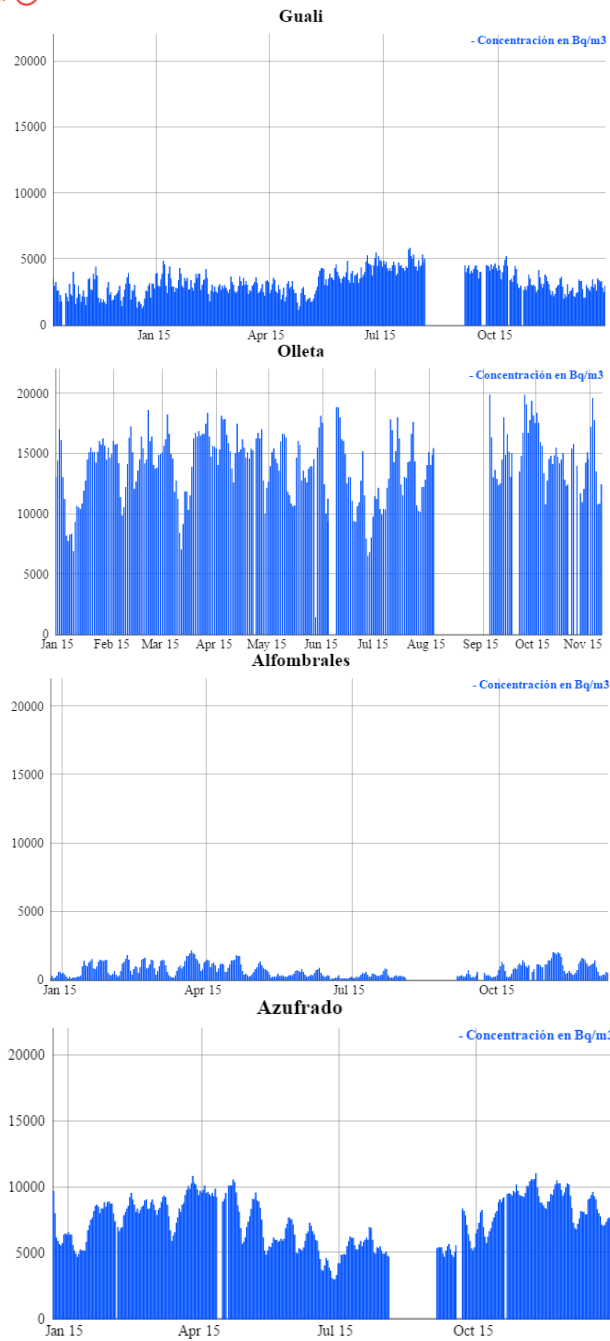


Figura 58. Variación de los niveles de Radón en suelo estaciones GUALI, OLLETA, AZUFRADO y ALFOMBRALES. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

1.4.4 Fuentes Termales (FT)

En el año 2015 se realizó monitoreo periódico en las fuentes termales, HOTEL, AGUAS CALIENTES, BOTERO LONDOÑO y NEREIDAS. Los valores en los parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales durante todo el año presentaron algunas variaciones. En la Figura 59 se aprecia el comportamiento de la temperatura en el tiempo para las cuatro FT, allí se aprecia que en el mes de Mayo hubo un incremento en 2 grados de la temperatura de la FT HOTEL para los meses siguientes presentó estabilidad. Las pequeñas variaciones presentadas pueden ser ocasionadas por infiltración de agua meteórica debido al régimen cambiante en las condiciones de lluvia en la zona volcánica.

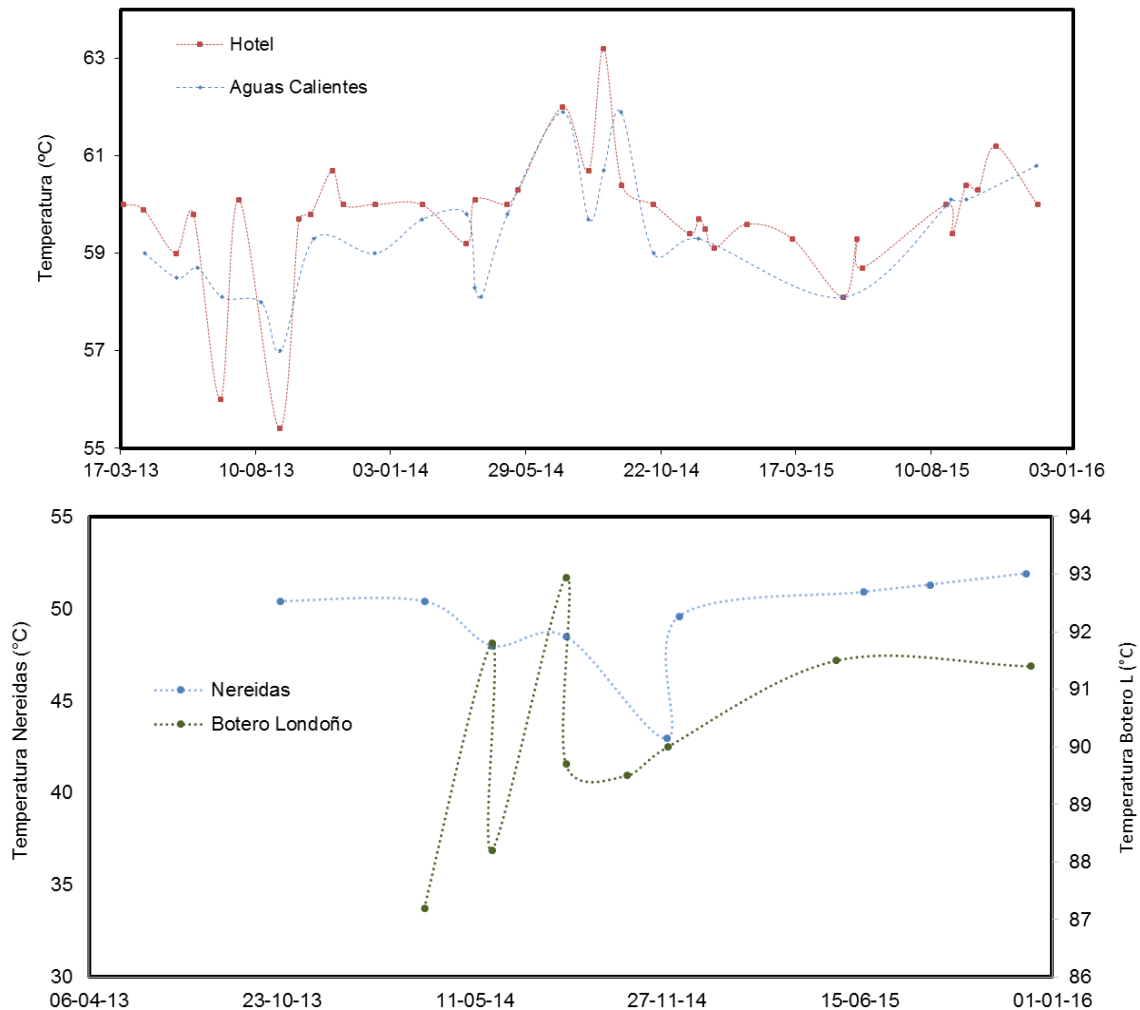


Figura 59. Variación de la Temperatura en Fuentes Termales: HOTEL, AGUAS CALIENTES, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

La temperatura de la FT AGUAS CALIENTES durante el 2015 fluctuó entre 58 y 60 °C, en la FT NEREIDAS la temperatura se mantuvo estable con un promedio de 51 °C. Para el nacimiento termal BOTERO LONDOÑO las medidas realizadas mostraron estabilidad con una temperatura 91.4 °C.

En lo referente al pH, durante el 2015 se presentaron algunas variaciones que pueden estar relacionadas con posibles mezclas con agua meteórica, no obstante en general los valores de pH para el año 2015 se mantuvieron dentro de sus líneas base (Figura 59).

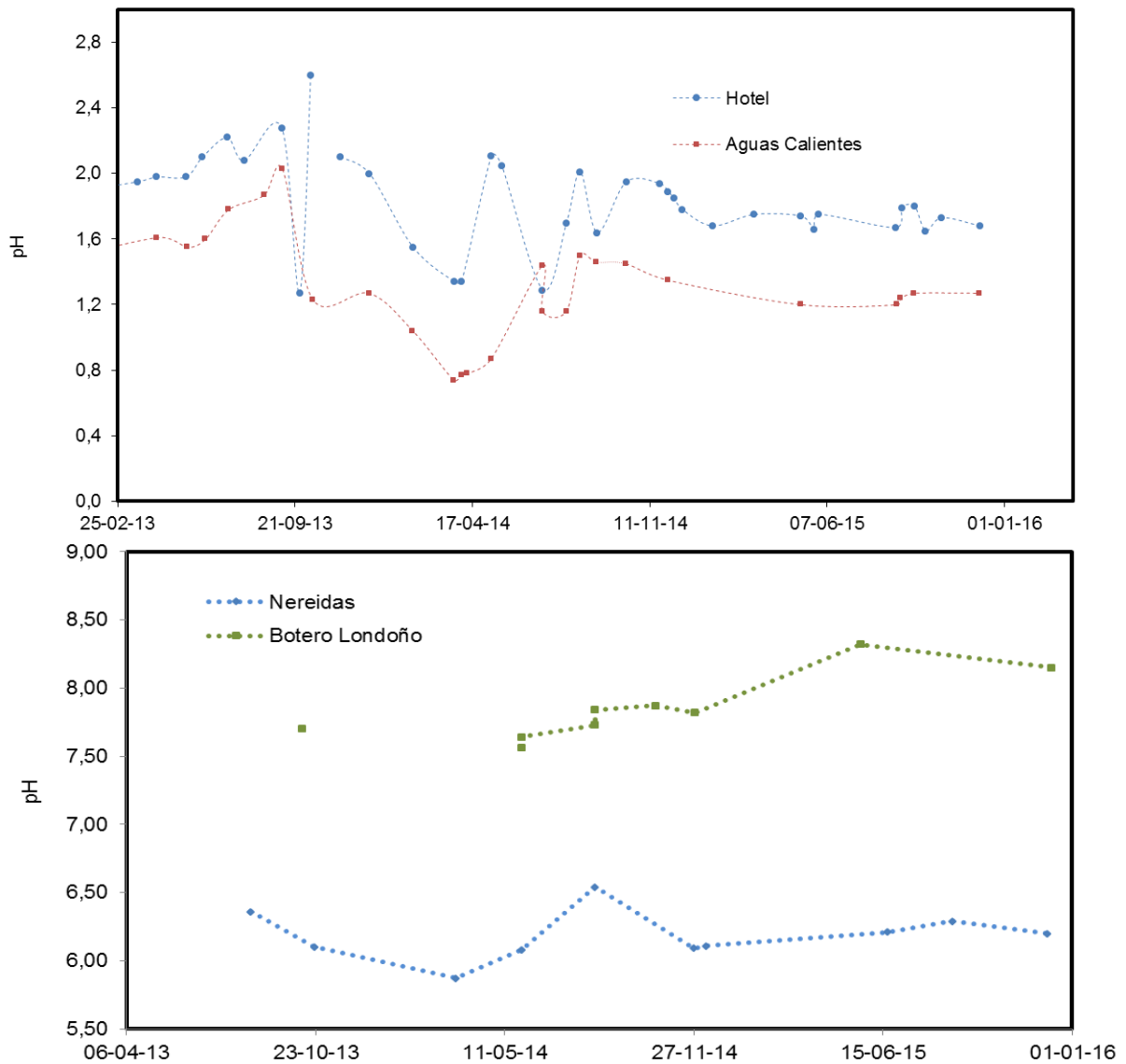


Figura 60. Variación del pH en Fuentes Termales HOTEL y AGUAS CALIENTES. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

Las medidas de conductividad eléctrica de las fuentes termales registradas en el año 2015 se mantuvieron estables, se presentaron fluctuaciones debidas a posibles mezclas con agua meteórica que hacen que se presente una carga iónica más fuerte en el agua. (Figura 61).

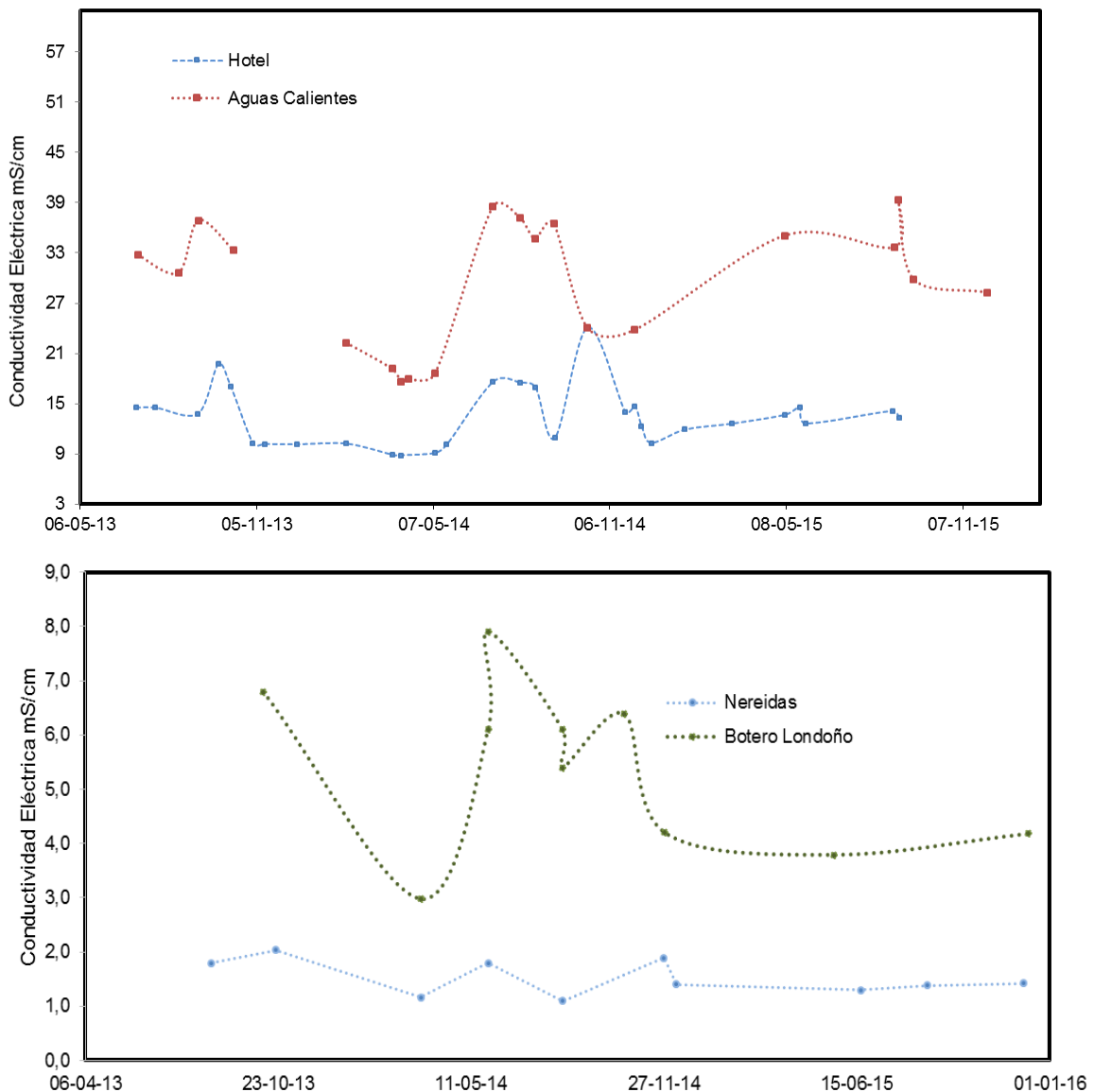


Figura 61. Variación de la conductividad eléctrica en Fuentes Termales HOTEL, AGUAS CALIENTES, NEREIDAS y BOTERO LONDOÑO. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

Respecto al contenido de aniones mayoritarios (Figura 62) no se presentaron variaciones en el contenido de Cloruros en las FT HOTEL y AGUAS CALIENTES durante las medidas realizadas en el 2015. El contenido de Sulfatos durante las medidas realizadas en el 2015 muestran algunas fluctuaciones para la FT AGUAS CALIENTES, no obstante los

valores medidos son menores respecto a las medidas de años anteriores. Para la FT HOTEL no se presentaron variaciones importantes.

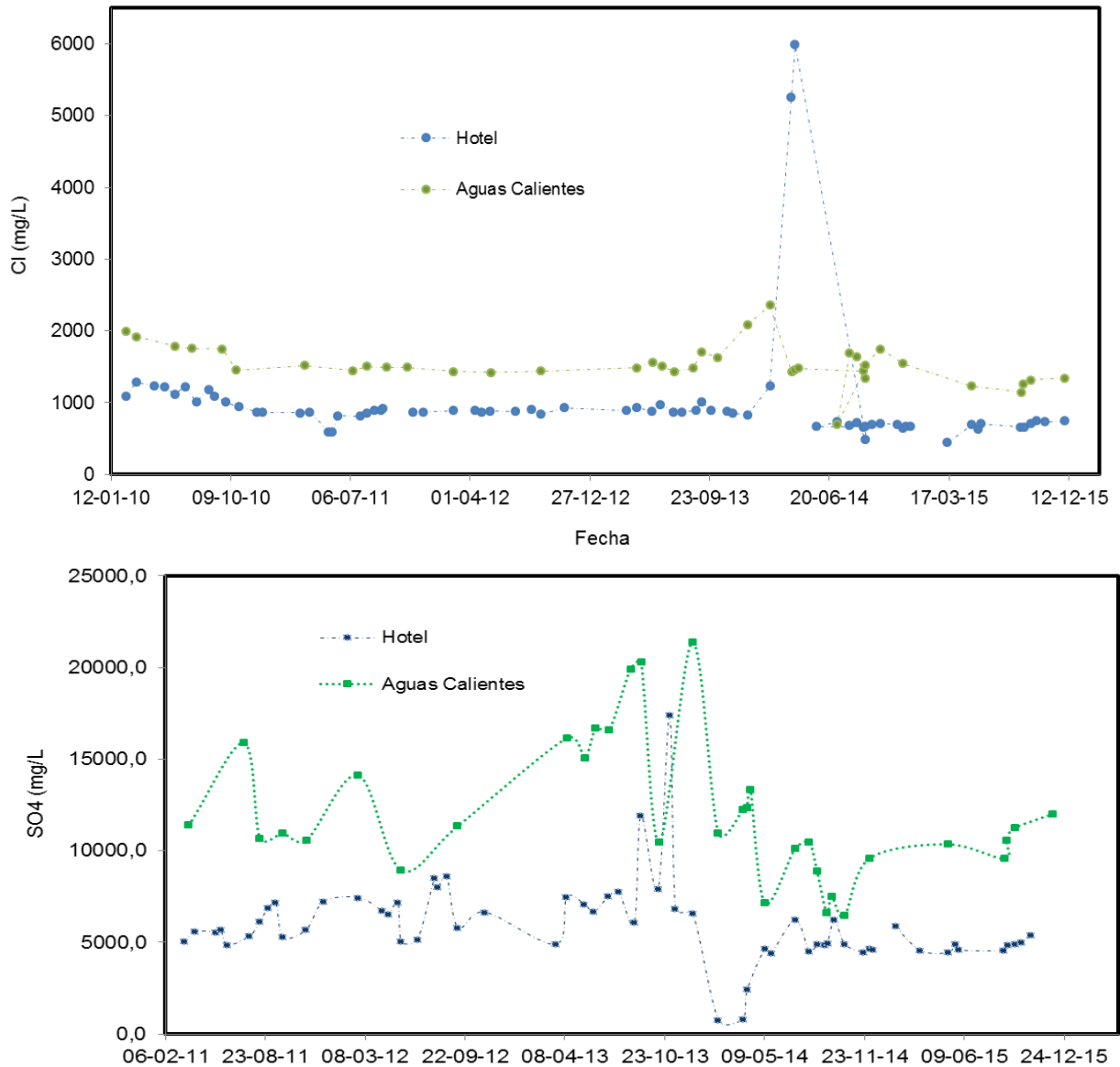


Figura 62. Variación de la Concentración de Sulfatos y Cloruros en las Fuentes Termales HOTEL y AGUAS CALIENTES. Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

1.4.5 Gases en Botellas de Giggenbach

En el año 2015 se tomaron muestras de la Fumarola NEREIDAS en los meses de Agosto y Diciembre, los datos obtenidos muestran que el mayor porcentaje de gases secos se tiene en CO₂, los porcentajes de SO₂ tuvieron una variación importante en el mes de

Agosto, registrando un mayor aporte en S, alcanzando un porcentaje de SO₂ del 47.73%. En la Tabla 8 se aprecian los valores de la concentración de gases secos de la Fumarola NEREIDAS.

Tabla 8. Datos de Gases en la Fumarola NEREIDAS (Porcentaje Molar en Base seca). Volcán Nevado del Ruiz. 2015.

FECHA	%CO ₂	%SO ₂	%H ₂ S	%HCl	S/HCl
2015-08-27	61,32	47,73	-10,96	1,92	16,81
2015-08-27	61,95	45,60	-10,50	2,95	10,42
2015-12-05	75,04	27,86	-5,39	2,49	7,90
2015-12-05	86,81	12,82	-2,29	2,66	3,47

2. VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA (VNT)

2.1 RED DE VIGILANCIA

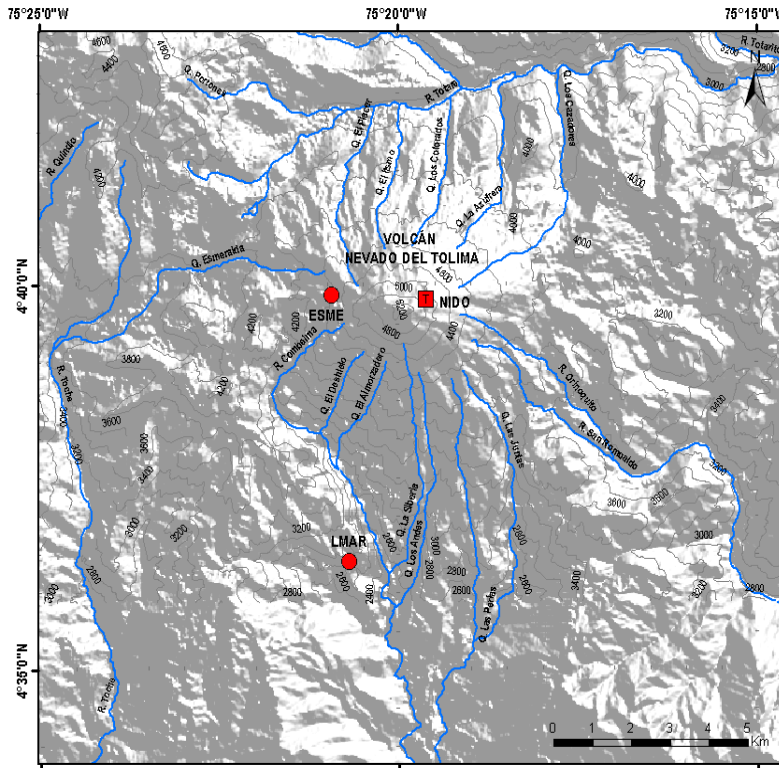
El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año 2015 fue del **90.2%**. Durante este año se destaca la migración de tecnología serial a TCP/IP que se realizó sobre la estación NIDO DE AGUILA. Además, se cambió el sismómetro corto periodo a ser banda ancha triaxial (Figura 63).



Figura 63. Estación NIDO DE AGUILA.

2.2 SISMOLOGÍA

El Volcán Nevado del Tolima mantuvo un nivel bajo de actividad sísmica durante el 2015 y ligeramente menor al año anterior. La red de monitoreo sísmológico (Figura 64), registró sismos asociados al fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico (Figura 65 y Figura 66). El sismo de mayor magnitud registrado en el año corresponde al evento ocurrido el 07 de Noviembre a las 09:22 (hora local), el cual alcanzó una magnitud de 1.2M_L (Magnitud Local) y estuvo localizado en el sector Sur-Suroccidente con respecto al cráter a una profundidad de 8.9 km. En general, estos eventos se localizaron alrededor del cráter y ocasionalmente en los sectores Occidente y Sur-Suroccidente del edificio volcánico a profundidades entre 2.1 y 11.7 km (Figura 67).



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE MANIZALES
RED SISMOLÓGICA VOLCÁN NEVADO DEL TOLIMA

SIMBOLOGÍA	
●	Banda Ancha
■	Corto Periodo Triaxial

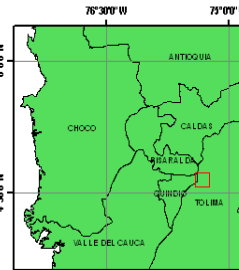


Figura 64. Red Sismológica. Volcán Nevado del Tolima.

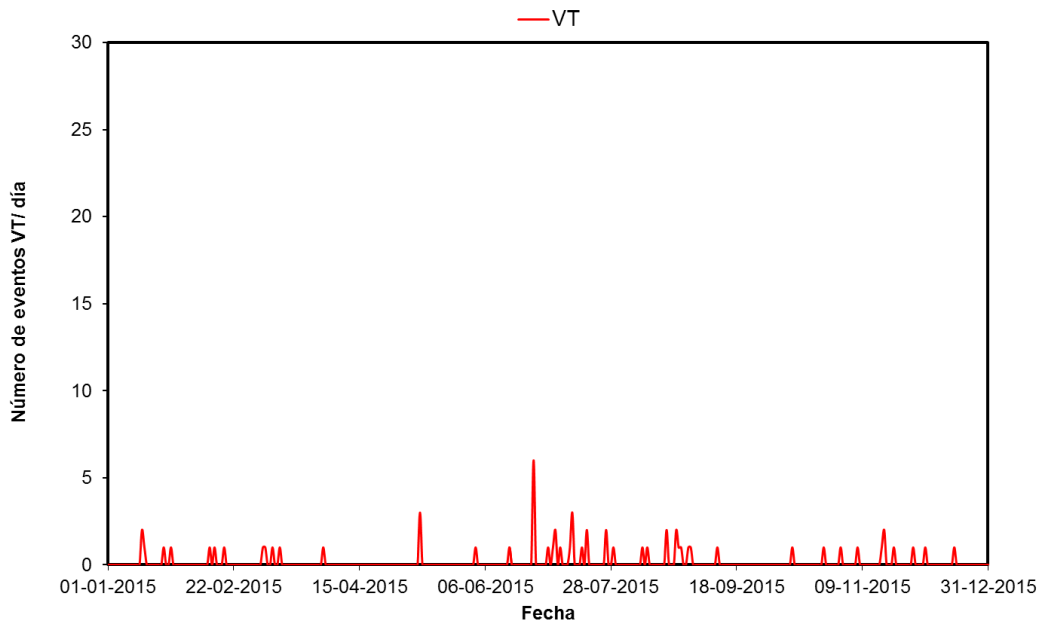


Figura 65. Número de sismos diarios ocurridos en el Volcán Nevado del Tolima durante el año 2015.

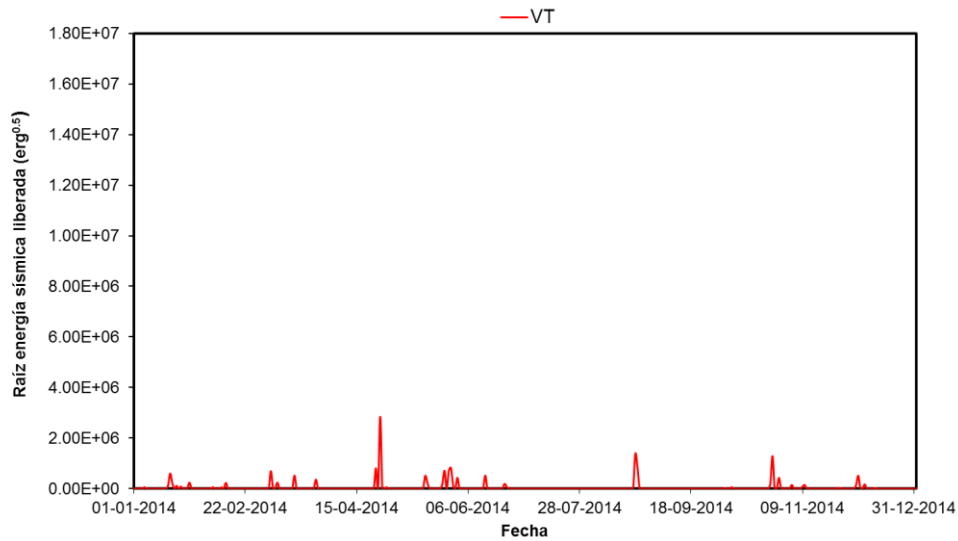


Figura 66. Raíz de la energía diaria liberada en el Volcán Nevado del Tolima durante el año 2015.

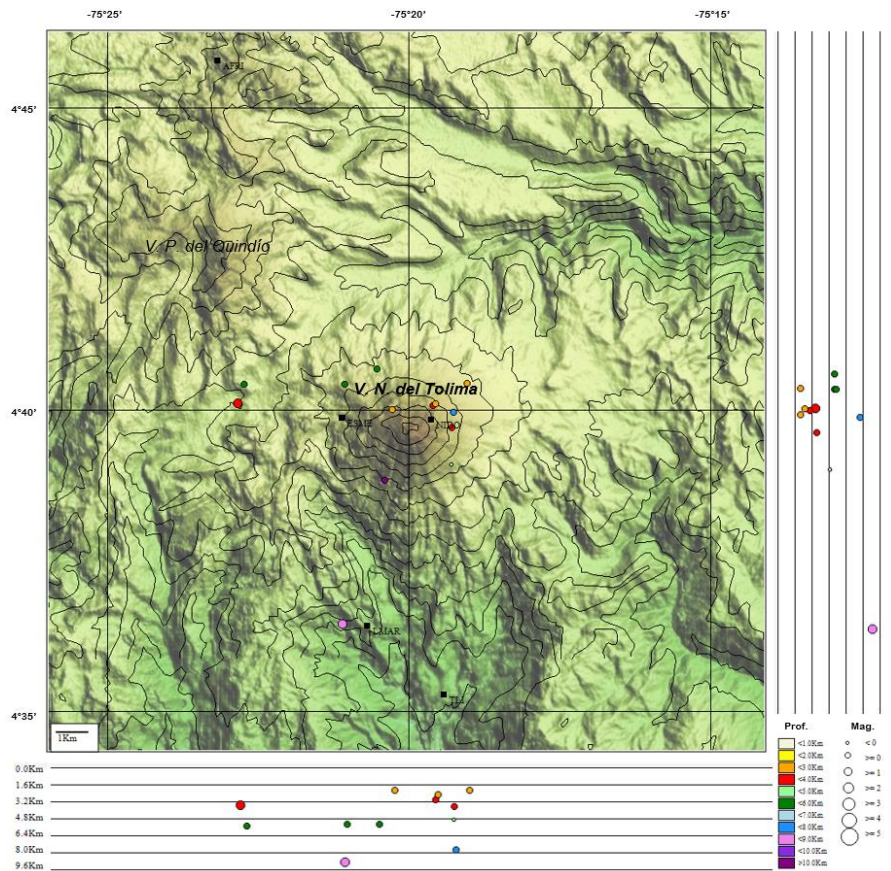


Figura 67. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores), registrados en el VNT durante el año 2015. Los cuadros negros representan las estaciones sismológicas.

2.2.1 Señales asociadas a la actividad glacial

Durante todo el año se registraron señales asociadas a pequeñas avalanchas de roca y/o hielo-nieve, producidas por el fenómeno de deshielo en la parte alta del volcán, debido a la dinámica natural del casquete glaciar y a las variaciones en las temperaturas y al régimen pluviométrico en la zona.

2.3 DEFORMACIÓN

Durante el 2015 funcionaron de manera intermitente los inclinómetros electrónicos ESME y LMAR debido a problemas de tipo electrónico. La Figura 68 muestra la red de deformación del VNT. La Figura 69 muestra el comportamiento de las 2 estaciones de deformación encargadas de registrar cualquier cambio deformativo en esta estructura volcánica.

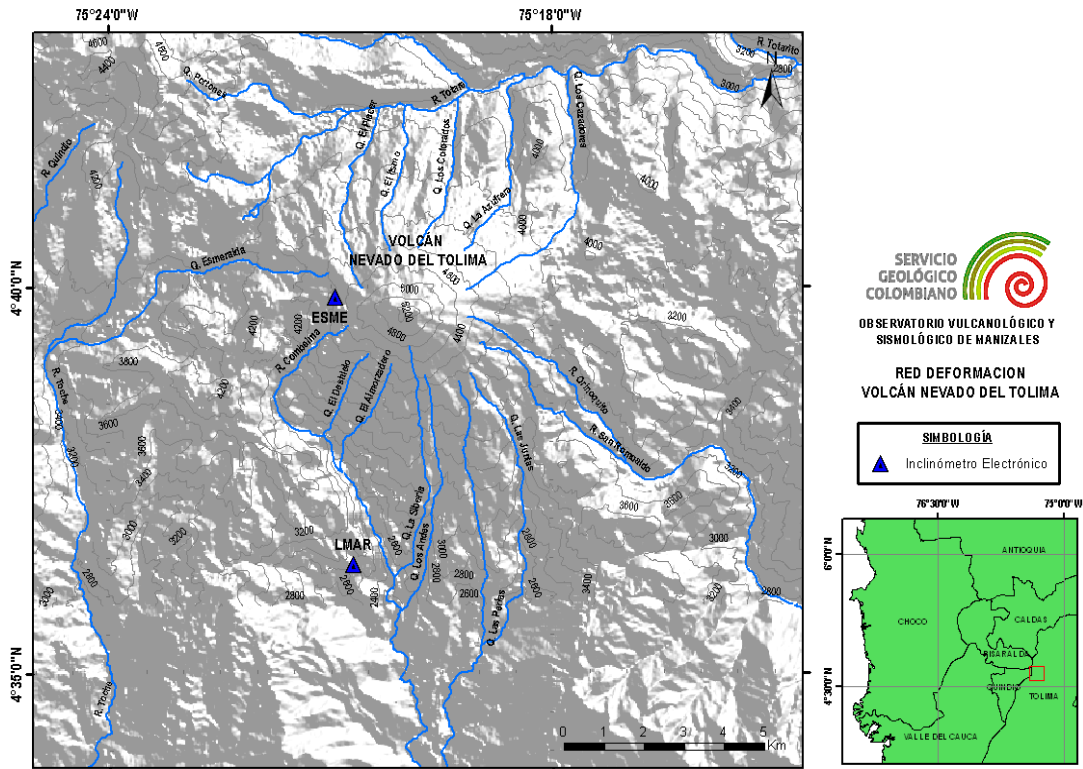


Figura 68. Red de deformación. Volcán Nevado del Tolima.

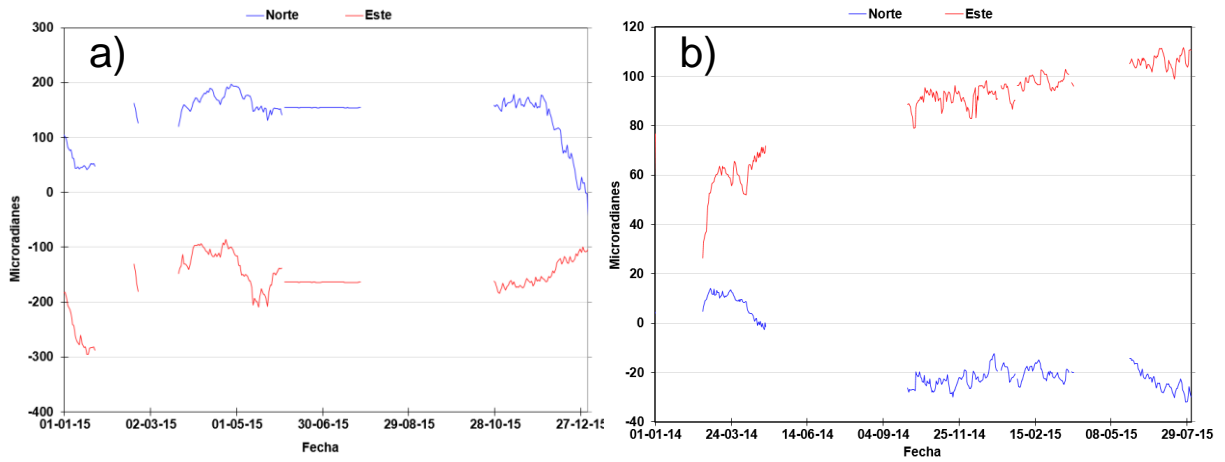


Figura 69. Comportamiento de las componentes Norte y Este de los inclinómetros electrónicos ESME (a) y LMAR (b), de la red de deformación del VNT durante 2015.

3. VOLCÁN CERRO MACHÍN (VCM)

3.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año 2015 fue del **71.4%**. Se resalta la instalación del Router en el repetidor CIELO ROTO del Volcán Cerro Machín para encaminar el tráfico de datos por el enlace satelital en caso de tener una caída por el enlace primario de radio telemétrico y la actualización de tecnología y el cambio de satélite por parte del operador de Telefónica S.A., que nos brinda una mayor velocidad de ancho de banda y estabilidad del satélite.

Adicionalmente durante este año se destaca la digitalización de las estaciones analógicas de corto periodo como son: SILENCIO, SAN JUAN, SAN LORENZO y SANTA MARTA. (Figura 70). También, se mejoraron los sistemas de suministro de energía eléctrica solar en muchas estaciones, reemplazando muchas estructuras de paneles solares por unas más robustas y con soporte para inclinaciones graduables con el fin de mitigar el efecto de las caídas de las hojas de los árboles en los paneles solares. También se reemplazaron algunos gabinetes metálicos de hierro por otros de fibra de vidrio.



Figura 70. Estación sismologica SAN LORENZO y SILENCIO. Volcan Cerro Machin.

Por otra parte, la red de monitoreo fue ampliada mediante la instalación de la estación geoquímica de gas Radón, ubicada en el domo principal (Figura 71).



Figura 71. Nuevas Estación de gas Radón. Volcán Cerro Machín.

3.2 SISMOLOGÍA

3.2.1 Sismos volcano-tectónicos

Durante el año 2015 la actividad sísmica del Volcán Cerro Machín se caracterizó por ser de tipo volcano-tectónica, asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico; la red de estaciones sismológicas (Figura 72), registró un total de 1662 eventos de carácter volcano-tectónico (VT) (Figura 73). En general estos eventos sísmicos presentaron niveles bajos de energía (Figura 74). La actividad sísmica se localizó principalmente en el domo principal y al Suroccidente del mismo a profundidades que variaron entre 1.8 y 4.8 km; al Suroriente (fuente distal entre 7 y 9 km de distancia al domo) a profundidades que variaron entre 8.0 y 16 km; y en menor proporción hacia el sector Suroriental y Nororiental a profundidades entre 1.5 y 9.0 km (Figura 75).

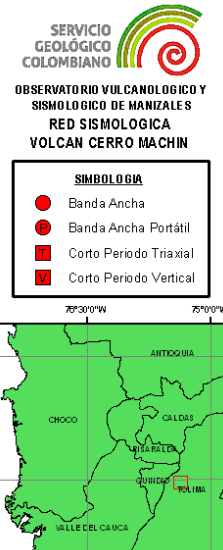
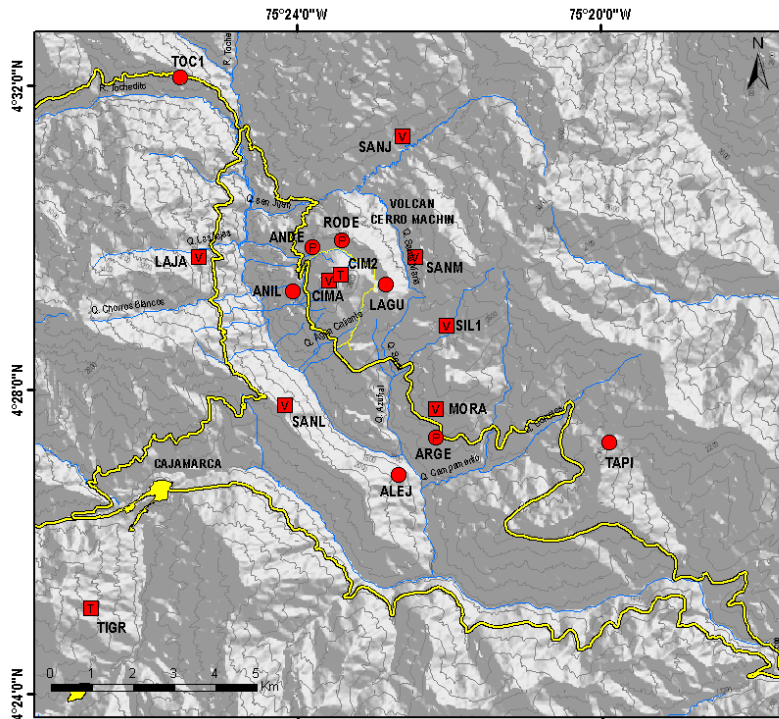


Figura 72. Red Sismológica. Volcán Cerro Machín.

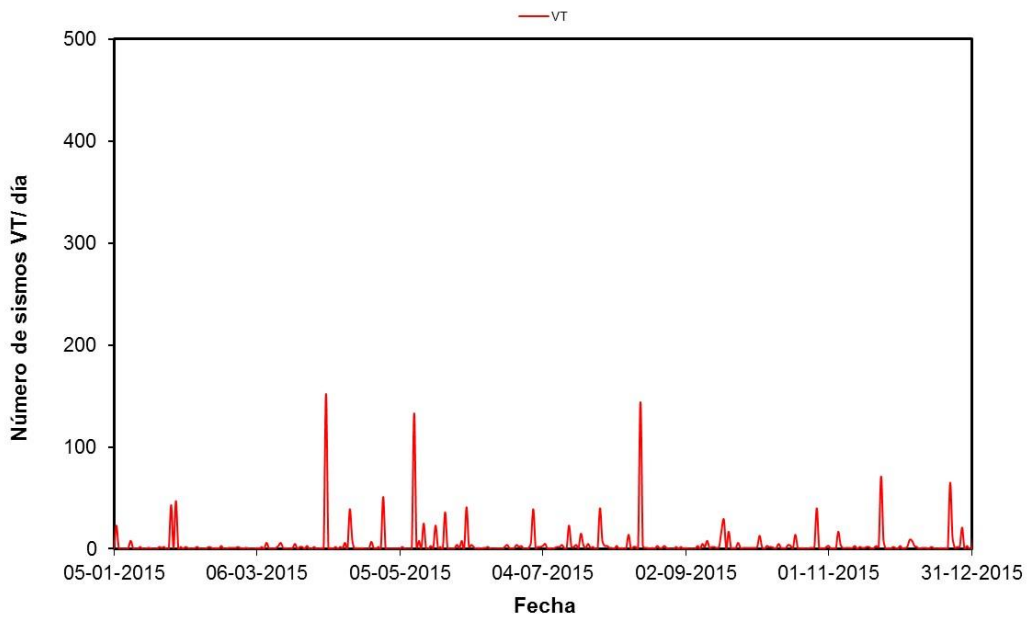


Figura 73. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el año 2015 en el VCM.

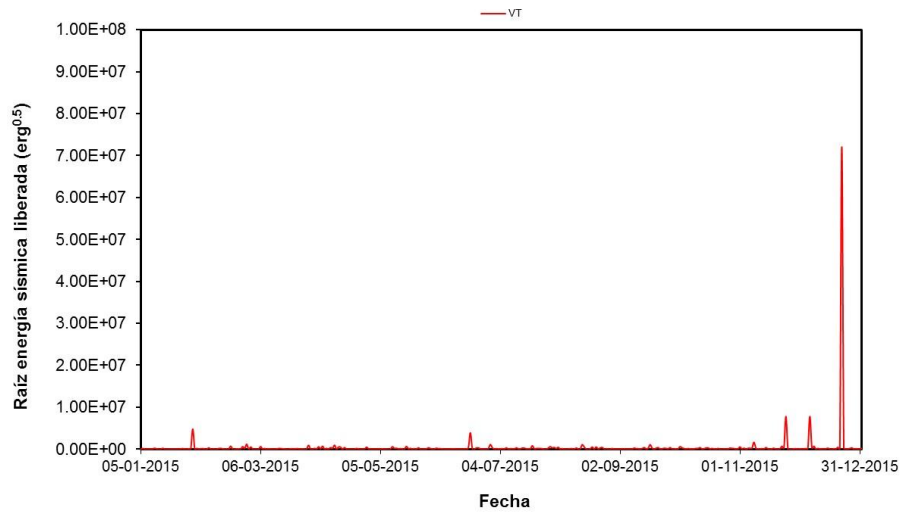


Figura 74. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT, registrados durante el año 2015 en el VCM.

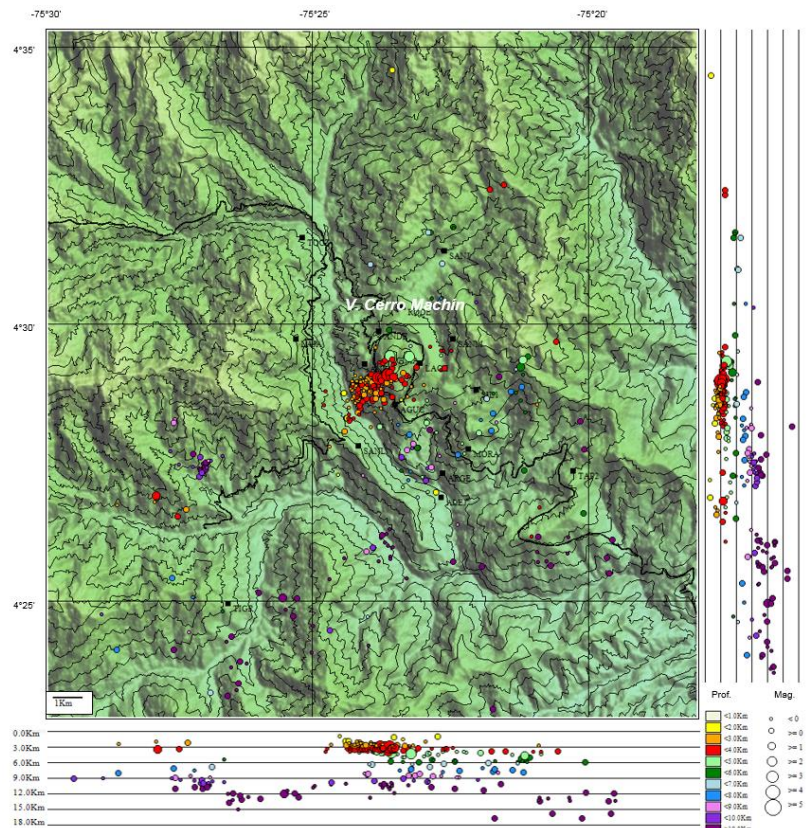


Figura 75. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VCM, durante el año 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas.

La máxima magnitud registrada durante el año fue de 3.0 M_L (magnitud local), asociada a dos sismos ocurridos el 22 de Diciembre (Figura 76 y Figura 77) a las 06:09 y 06:22 respectivamente (hora local), durante un incremento sísmico en donde se registraron alrededor de 65 eventos (Figura 78), localizados en el domo principal a profundidades que oscilaron entre 3.1 y 4.1 km.

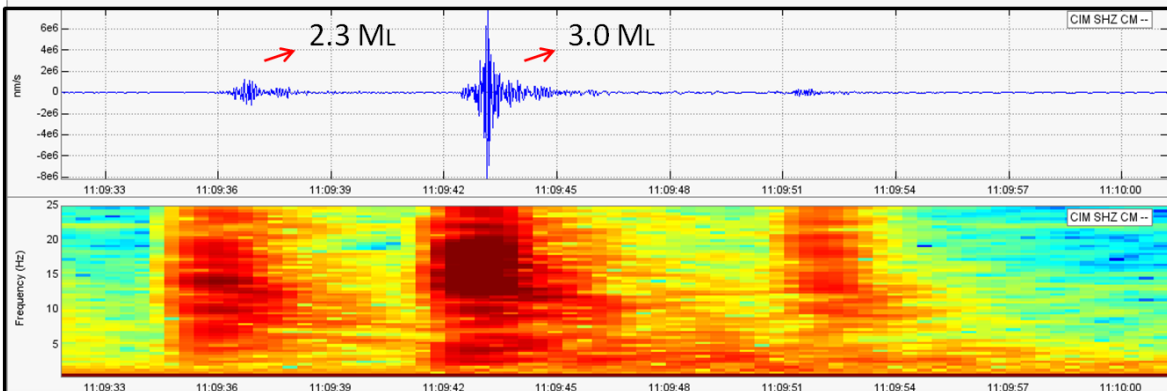


Figura 76. Registro sísmico y espectrograma asociados a los eventos sísmicos tipo VT de mayor energía registrados durante el mes de Diciembre en el VCM, ocurrido el día 22 de Diciembre a las 06:09 (hora local). Estación CIMA, componente vertical.

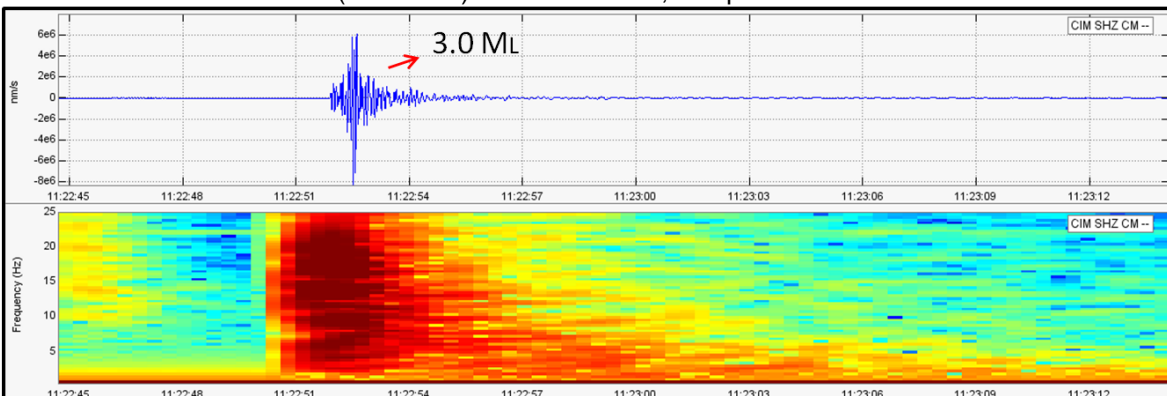


Figura 77. Registro sísmico y espectrograma asociados al evento sísmico tipo VT de mayor energía registrado durante el mes de Diciembre en el VCM, ocurrido el día 22 de Diciembre a las 06:22 (hora local). Estación CIMA, componente vertical.



Figura 78. Sismograma estación CIMA, componente vertical el 22 de Diciembre entre las 05:00 y las 07:00 (hora local). Se observan los sismos registrados durante el incremento. Los sismos destacados con estrellas de color amarillo corresponden con los de mayor magnitud registrados durante el incremento, ambos con una magnitud 3.0 M_L (Magnitud local).

3.3 OTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS

3.3.1 Magnetometría

Durante el año 2015, los magnetómetros de las estaciones AGUAS CALIENTES y DOMO del Volcán Cerro Machín, continuaron mostrando una tendencia hacia valores bajos con cambios periódicos en sus componentes, algunas de estas variaciones estuvieron asociadas con tormentas solares y alteraciones del campo magnético regional (Figura 79 y Figura 80). En cuanto a la estación magnetométrica AGUAS CALIENTES, ésta fue retirada del sitio desde finales del mes de Noviembre para mantenimientos y ajustes en laboratorio de Servicio Geológico Colombiano.

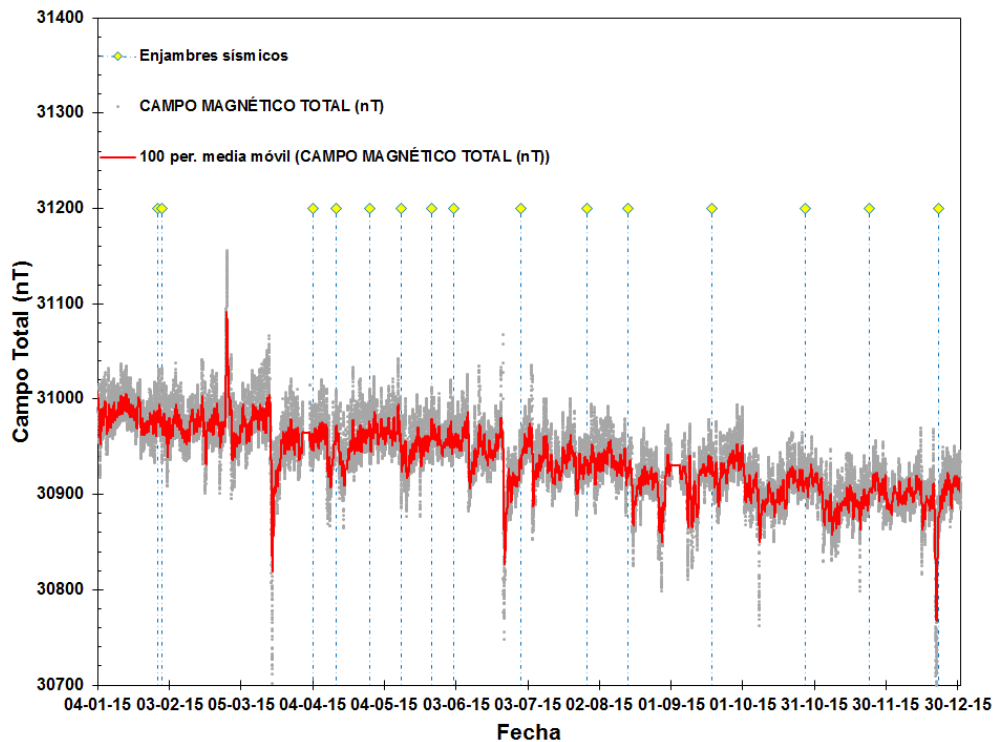


Figura 79. Variaciones del campo magnético en el Volcán Cerro Machín, Enero-Diciembre de 2015, Estación DOMO.

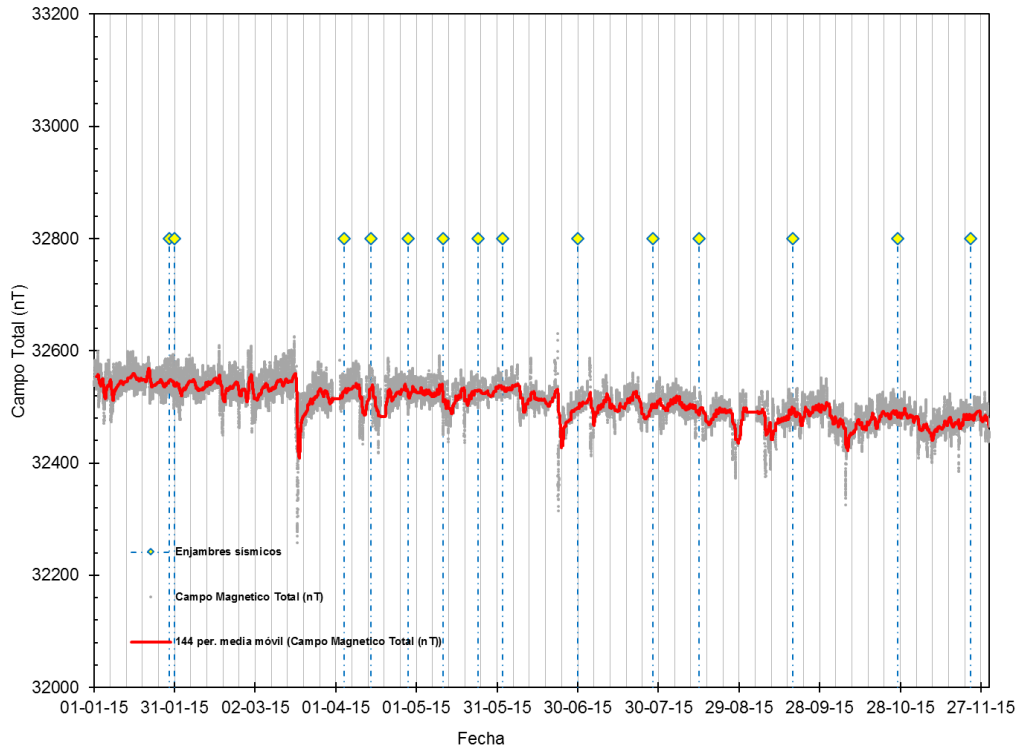
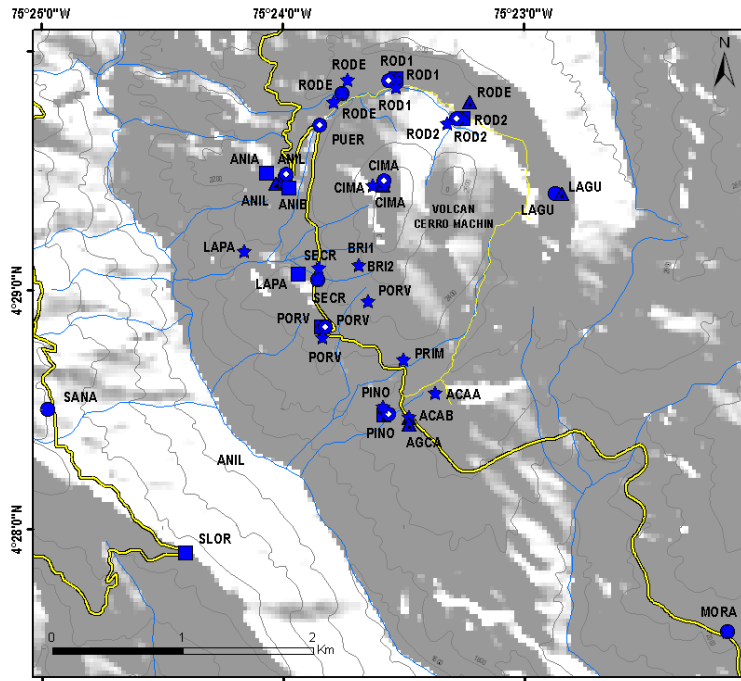


Figura 80. Variaciones del campo magnético en el Volcán Cerro Machín, Enero-Noviembre de 2015, Estación AGUAS CALIENTES.

3.4 DEFORMACIÓN

Durante 2015 operaron correctamente cinco estaciones GPS permanentes y cuatro de los cinco inclinómetros electrónicos instalados en el volcán. La Figura 81 muestra la red de deformación del Volcán Cerro Machín. Los datos de las estaciones GPS permanentes LAGU, MRAL, RODE, SANA y SECR fueron procesados con los programas Trimble 4D Control y GAMIT-GLOBK, obteniendo las series de tiempo respectivo. Todas las estaciones evidenciaron una correcta operación y un comportamiento de estabilidad en las componentes Norte, Este y Vertical (Figura 82, Figura 83 y Figura 84).



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE MANIZALES
RED DEFORMACION VOLCAN CERRO MACHIN

SIMBOLOGIA	
■	Base EDM
●	GNSS
○	GNSS Campaña
▲	Inclinómetro Electrónico
★	Reflector EDM

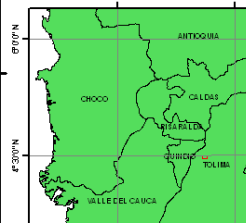


Figura 81. Red de deformación. Volcán Cerro Machín.

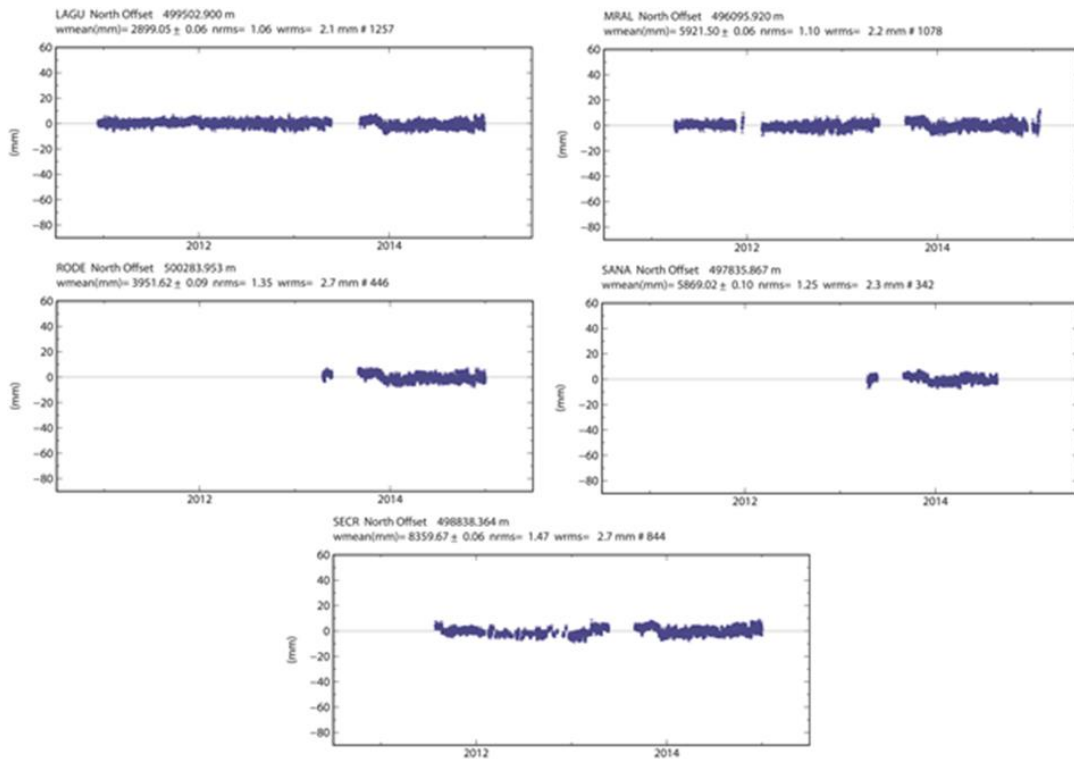


Figura 82. Series de tiempo componente Norte de las estaciones GPS LAGU, MRAL, RODE, SANA y SECR del VCM obtenidas con el software Gamit-Globk.

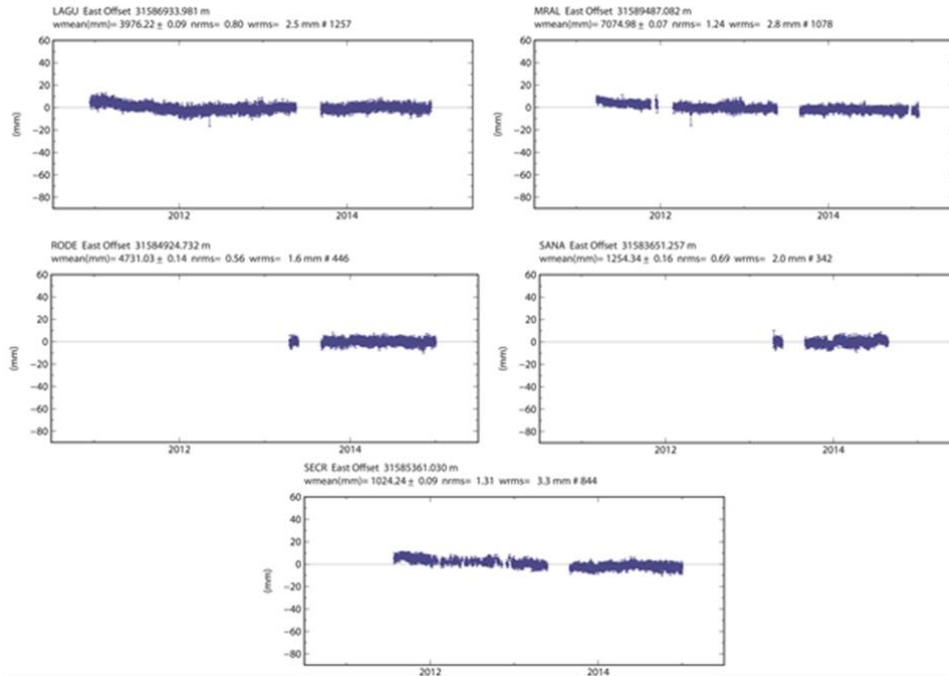


Figura 83. Series de tiempo componente Este de las estaciones GPS LAGU, MRAL, RODE, SANA y SECR del VCM obtenidas con el software Gamit-Globk.

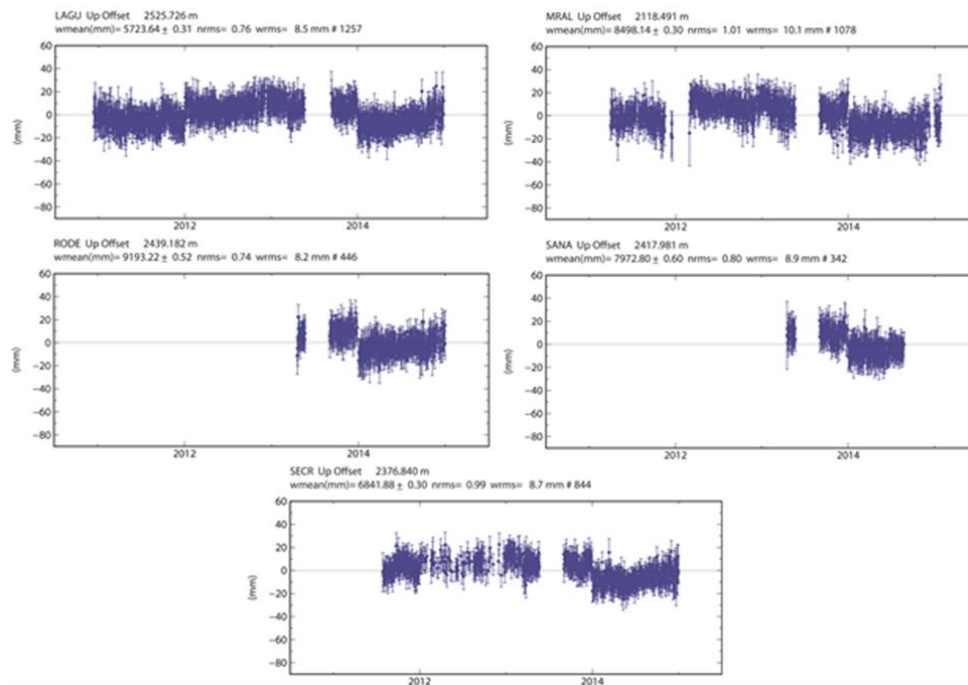


Figura 84. Series de tiempo componente Vertical de las estaciones GPS LAGU, MRAL, RODE, SANA y SECR del VCM obtenidas con el software Gamit-Globk.

El comportamiento de los inclinómetros electrónicos ANIL, LAGU y RODE se caracterizaron por mostrar pequeñas fluctuaciones asociadas a las variaciones térmicas y un comportamiento de estabilidad en sus dos componentes. La componente Norte y Este del inclinómetro CIMA continua presentando un constante ascenso desde su instalación en Marzo de 2011, registrado un cambio acumulado de 654 μrad y 386 μrad para las componentes N y E respectivamente hasta Diciembre de 2015 (Figura 85).

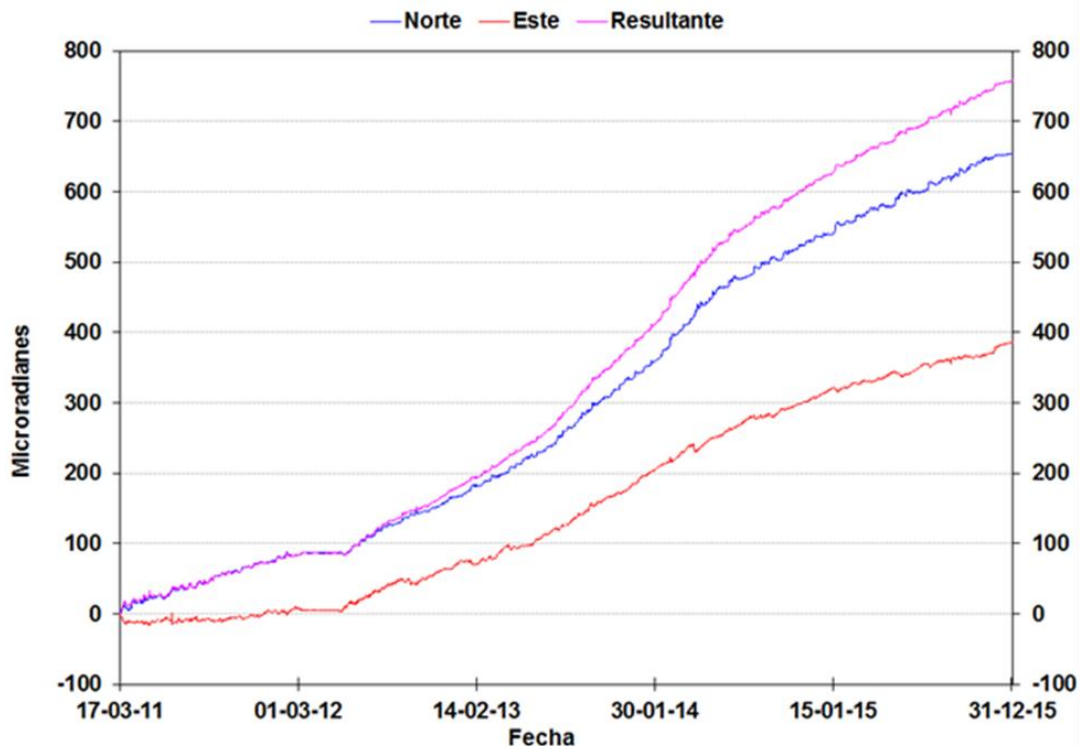


Figura 85. Comportamiento de las componentes Norte (Azul), Este (Rojo) y Resultante (Magenta) del inclinómetro electrónico CIMA, de la red de deformación del VCM hasta Diciembre de 2015.

3.5 GEOQUÍMICA

Durante el año 2015 el grupo de Geoquímica del SGC-OVSM realizó muestreos y análisis in situ de los nacimientos termales PISCINA, ESTATUAS, PUENTE TIERRA, TOCHE y LAS DELICIAS. También se realizó monitoreo permanente de las estaciones de Gas Radón LAGUNA y ALEJANDRÍA, las otras dos estaciones AGUAS CALIENTES y CIMA presentaron problemas en su operatividad, por lo tanto no se presentan datos en este informe. En la Figura 86 se presenta el mapa con las estaciones de monitoreo geoquímico en el VCM.

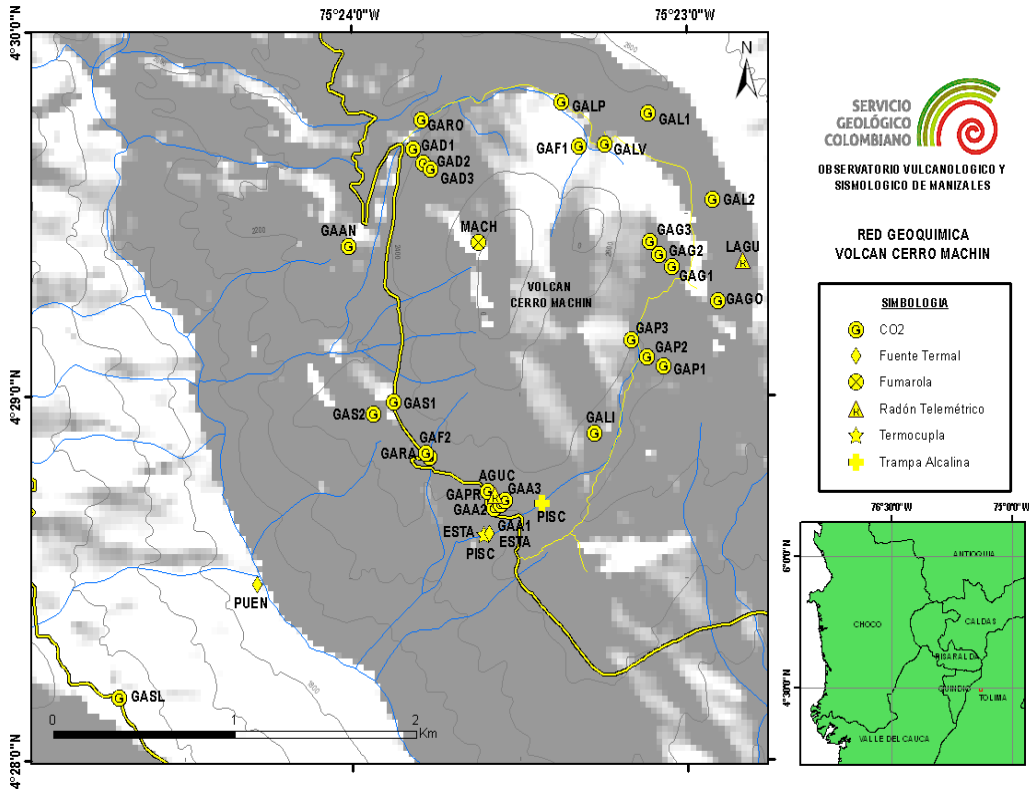
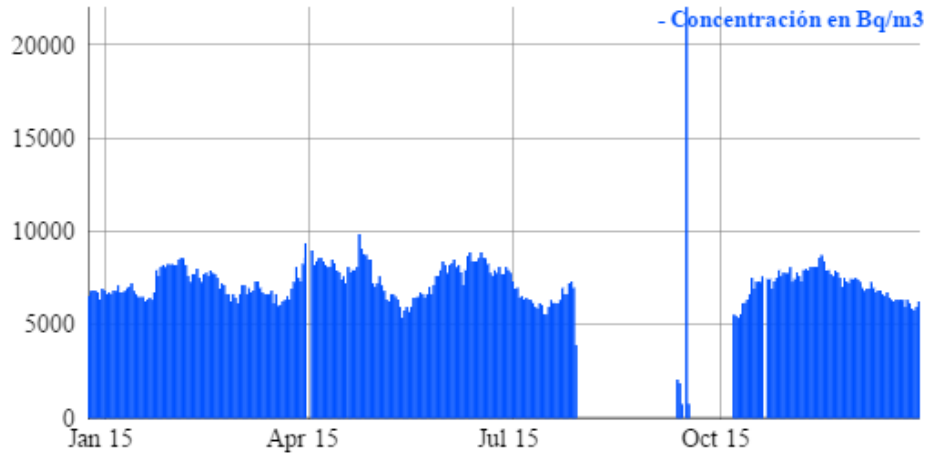


Figura 86. Red Geoquímica. Volcán Cerro Machín.

3.5.1 Medidas de Gas Radón

Durante el 2015 se realizó un monitoreo continuo de la desgasificación difusa de Gas Radón mediante las estaciones ALEJANDRÍA y LAGUNA (Figura 87), las dos estaciones mostraron estabilidad en sus datos durante todo el año, la estación ALEJANDRÍA presentó algunos inconvenientes de transferencia de datos durante los meses de Julio a Octubre.

Alejandria



Laguna

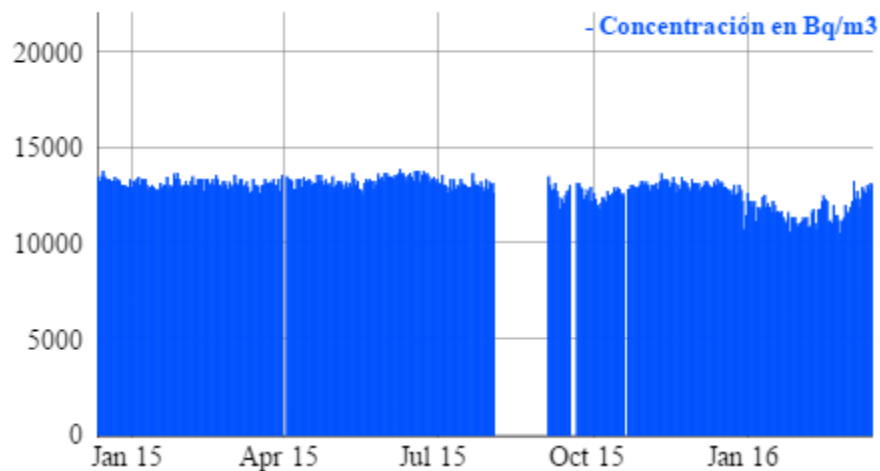


Figura 87. Comportamiento de las estaciones de Gas Radón ALEJANDRIA y LAGUNA. Volcán Cerro Machín. 2015.

3.5.2 Fuentes Termales (FT)

Durante el 2015, se realizaron dos visitas al VCM para toma de muestras y datos fisicoquímicos in situ. De acuerdo a los datos obtenidos en campo se pudo establecer que la temperatura de los nacimientos termales mostró una pequeña disminución respecto a los valores que se registraron en el 2014, la temperatura promedio medida en la FT PISCINA en los meses de Junio y Octubre fue de 78.05 °C (Figura 88).

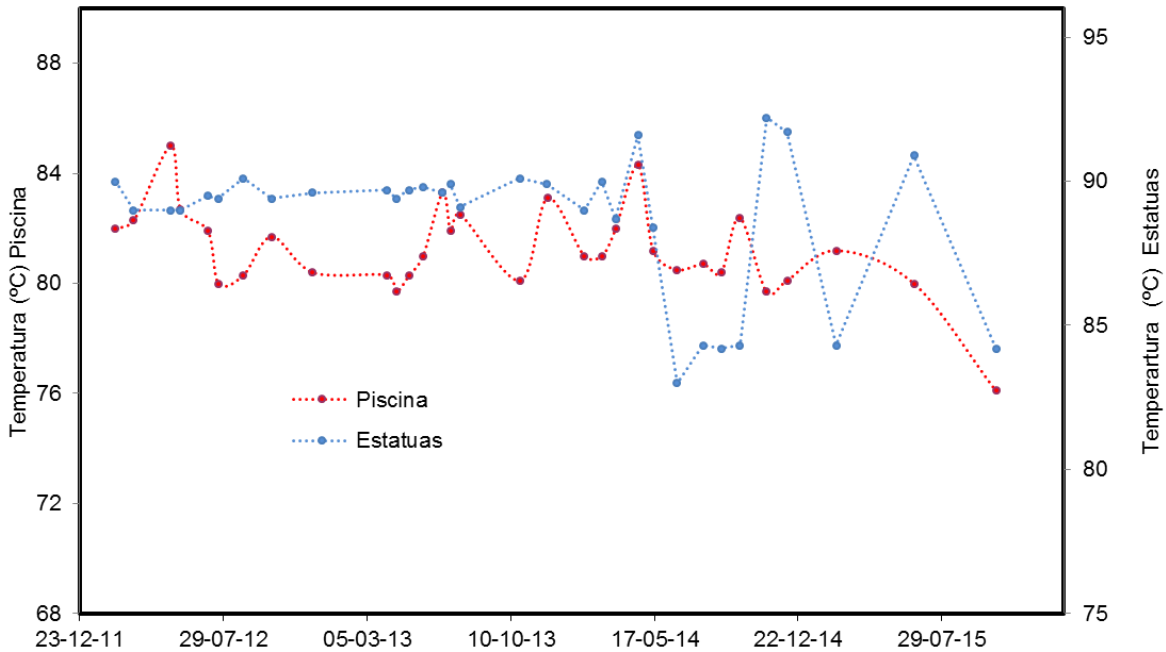


Figura 88. Variación de la Temperatura en Fuentes Termales: PISCINA y ESTATUAS. Volcán Cerro Machín. 2015.

En cuanto al potencial de Hidrógeno, de acuerdo a las medidas realizadas in situ los dos nacimientos termales presentaron estabilidad en su pH, el promedio de pH para PISCINA fue de 7.42 y para ESTATUAS 7.4. En la Figura 89 se aprecia la variación con el tiempo del potencial de hidrógeno para éstos manantiales termales.

La Conductividad Eléctrica de los manantiales termales también se mantuvo estable en las medidas realizadas en el 2015, no obstante las variaciones presentadas en años anteriores son atribuidas a posibles mezclas con agua meteórica lo cual provocó el incremento de iones en solución durante las medidas. En la Figura 90 se aprecia el comportamiento de la conductividad eléctrica con el tiempo.

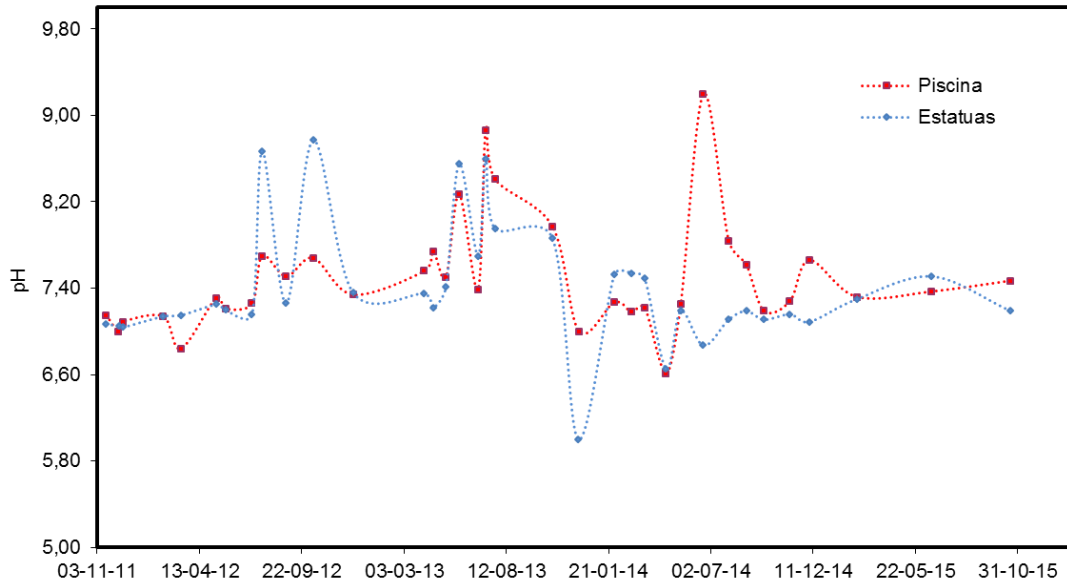


Figura 89. Variación del pH en Fuentes Termales: PISCINA y ESTATUAS. Volcán Cerro Machín. 2015.

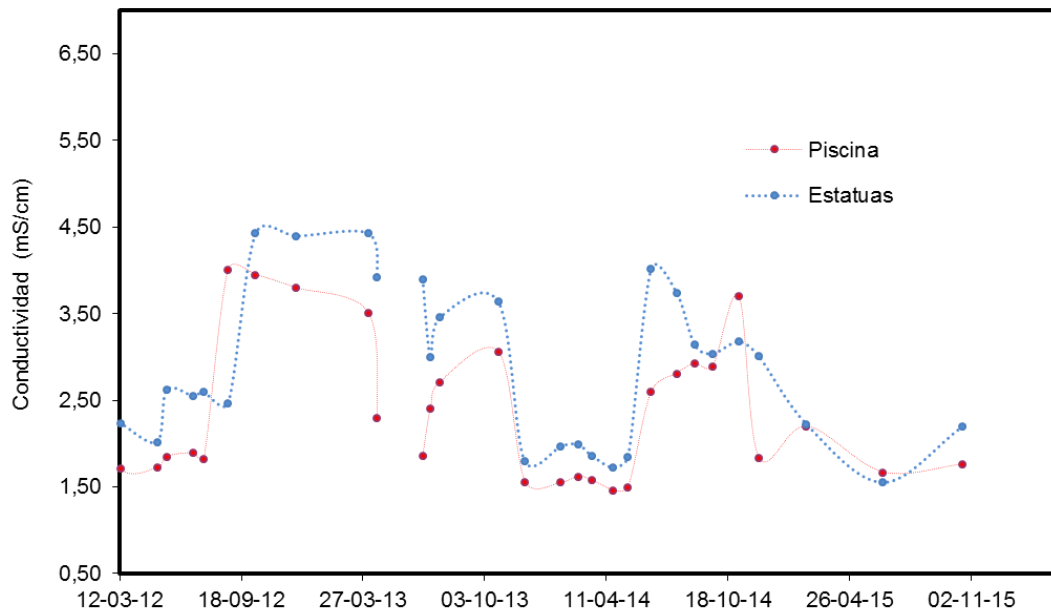


Figura 90. Variación de la Conductividad Eléctrica Fuentes Termales PISCINA y ESTATUAS. Volcán Cerro Machín. 2015.

En Octubre del 2015 se realizó monitoreo a las FT PUENTE TIERRA, TOCHE y LAS DELICIAS, en la Tabla 9 se muestran los resultados fisicoquímicos del monitoreo realizado.

Tabla 9. Parámetros Físicoquímicos FT PUENTE TIERRA, TOCHE y LAS DELICIAS. Volcán Cerro Machín.

FECHA	NOMBRE	T (°C)	pH	Conductividad Eléctrica (mS/cm)
2015-10-21	Puente Tierra	78	8.0	2.06
2015-10-21	Toche	35.8	6.63	2.32
2015-10-21	Las Delicias	36.2	6.57	2.63

3.5.3 Termocupla FT-ESTATUAS

El monitoreo continuo de la temperatura en la FT ESTATUAS se realizó mediante una termocupla instalada directamente en el manantial termal, en la Figura 91 se aprecia que la variación de la temperatura en el manantial termal es muy pequeña, los valores de temperatura oscilaron entre 84 y 86 °C.

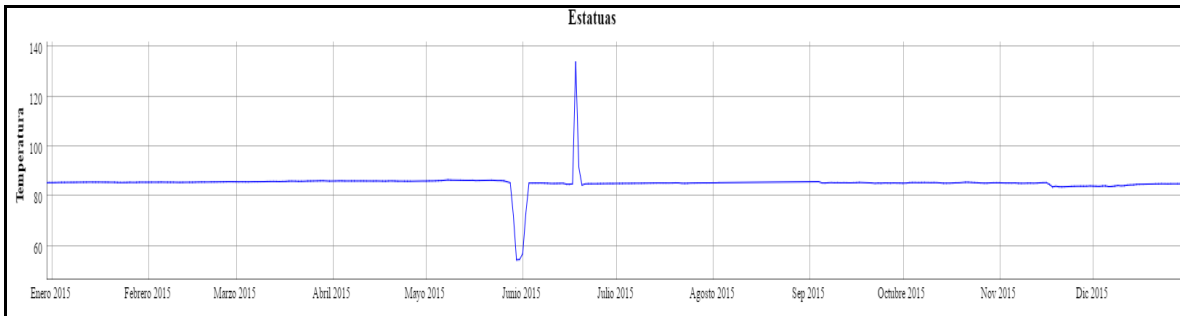


Figura 91. Monitoreo Telemétrico de la Temperatura en la Fuente Termal ESTATUAS. Volcán Cerro Machín. 2015.

4. VOLCÁN CERRO BRAVO (VCB)

4.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año 2015 fue del **73.5%**. Se destaca instalación de nuevo sitio repetidor en VCB para el rediseño de la topología de la red telemétrica del enlace PIRANA - HERVEO – CERRO BRAVO – DESQUITE - MANIZALES y BILLAR – PITAYO – CERRO BRAVO – DESQUITE – MANIZALES (Figura 92).



Figura 92. Instalación de repetidor CERRO BRAVO.

Durante este año se destaca la digitalización de la estación analógica de corto periodo CAJONES (Figura 93). También, se mejoraron los sistemas de suministro de energía eléctrica solar en varias estaciones, reemplazando muchas estructuras de paneles solares por unas más robustas y con soporte para inclinaciones graduables con el fin de mitigar el efecto de la ceniza que se acumula durante una emisión.



Figura 93. Digitalización estación de corto periodo CAJONES.

4.2 SISMOLOGÍA

En el Volcán Cerro Bravo durante el 2015 se registró principalmente actividad sísmica asociada con el movimiento de fluidos al interior de las cavidades y conductos volcánicos, y esporádicamente, actividad asociada al fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico.

4.2.1 Sismos de Largo Periodo (LP)

La red de estaciones sismológicas (Figura 94) registró 44 señales relacionadas con la dinámica de fluidos al interior de los conductos volcánicos (Figura 95); estas señales se caracterizaron en su mayoría por ser de carácter profundo y mostrar duraciones entre 13 y 84 s. La señal sísmica de mayor energía relacionada con este tipo de dinámica ocurrió el día 01 de Agosto de 2015 a las 10:58 (Hora local) (Figura 96).

4.2.2 Señales asociadas con actividad superficial

La red de estaciones sismológicas (Figura 94) registró 10 señales asociadas a pequeñas avalanchas y desprendimiento de bloques, los cuales presentaron duraciones variables.

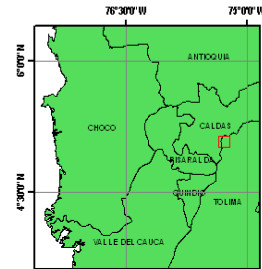
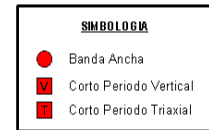
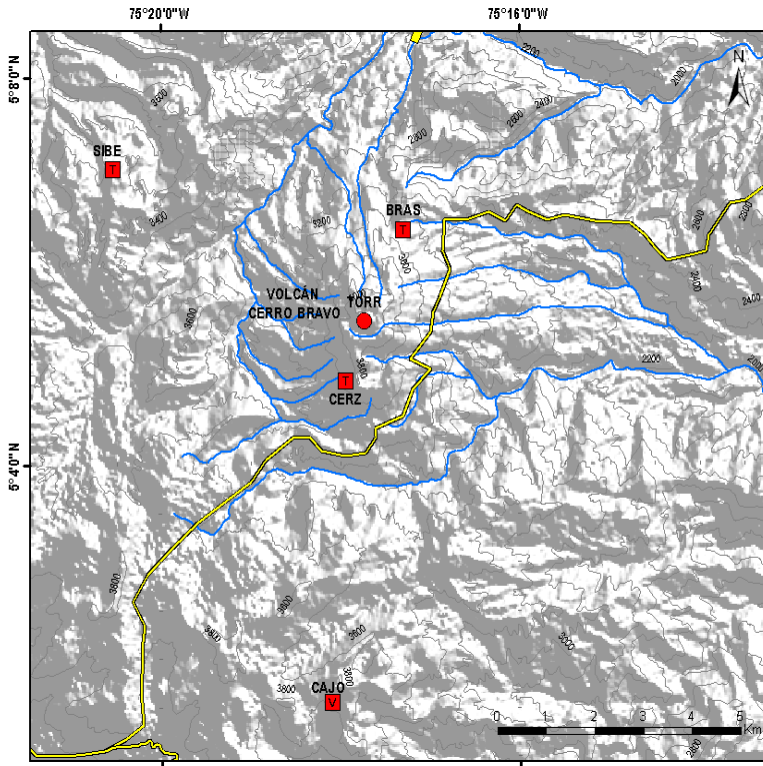


Figura 94. Red Sismológica. Volcán Cerro Bravo.

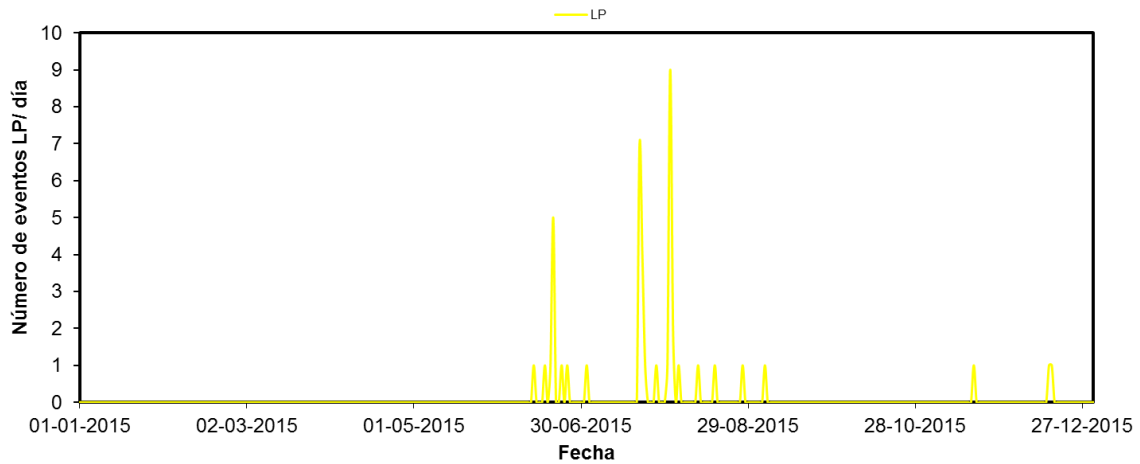


Figura 95. Número de eventos sísmicos tipo LP diarios, ocurridos durante el 2015 en el Volcán Cerro Bravo.

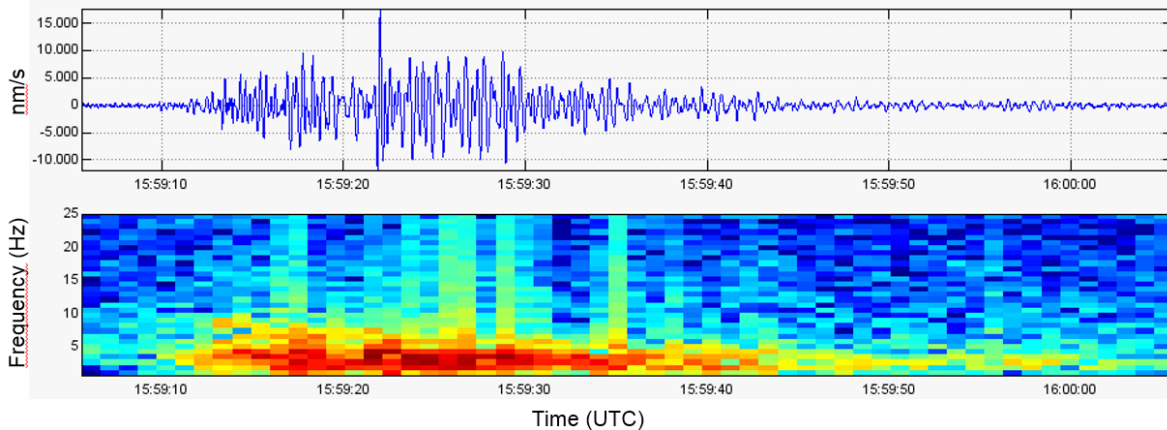


Figura 96. Registro sísmico y espectrograma asociado al sismo de tipo LP de mayor energía del 2015 en el VCB, registrado el día 01 de Agosto a las 10:59 (Hora local), duración 52 s. Componente vertical, estación BRASIL, Forma de onda de la señal sísmica (arriba) y Espectrograma del sismo LP (abajo).

4.3 DEFORMACIÓN

Durante 2015 operó intermitentemente el inclinómetro electrónico CBRA debido a problemas electrónicos, que fueron corregidos a finales de noviembre de 2015. La Figura 97 muestra la red de deformación del Volcán Cerro Bravo.

El comportamiento del inclinómetro electrónico CBRA durante su funcionamiento se caracterizó por registrar pequeñas fluctuaciones dentro del rango de $\pm 10 \mu\text{rad}$, las cuales se asocian a los cambios de temperatura en el lugar y que evidencian la correcta operación de la estación. Su comportamiento se caracterizó por ascenso en sus dos componentes durante la primera parte del año hasta abril de 2015, fecha en la cual salió de operación. Al finalizar el año, el inclinómetro continuó mostrando ascenso en las dos componentes (Figura 98).

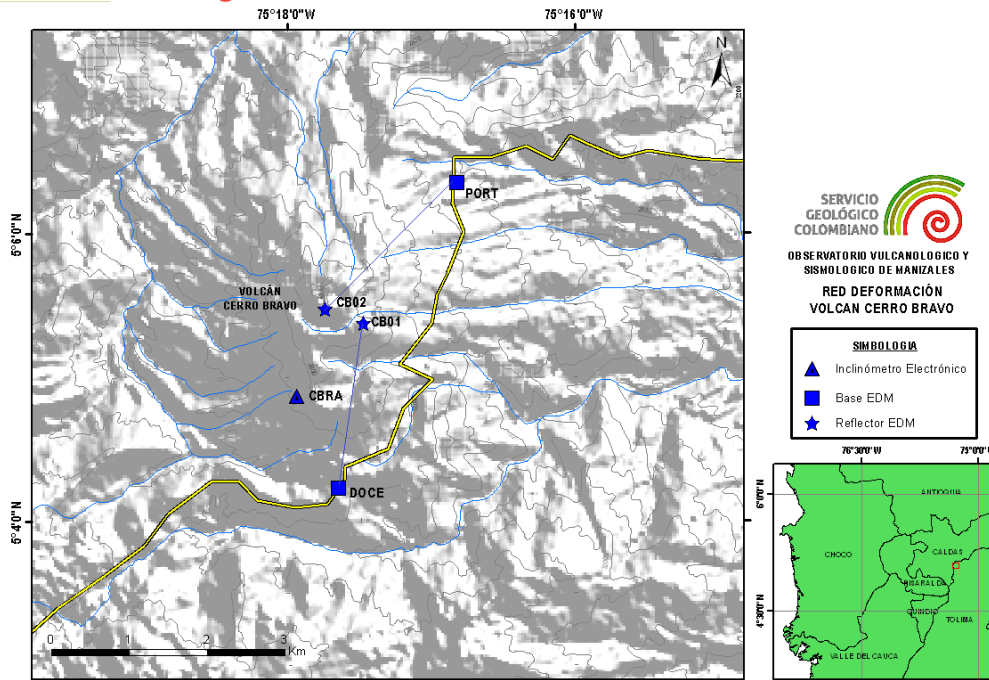


Figura 97. Red de deformación del Volcán Cerro Bravo.

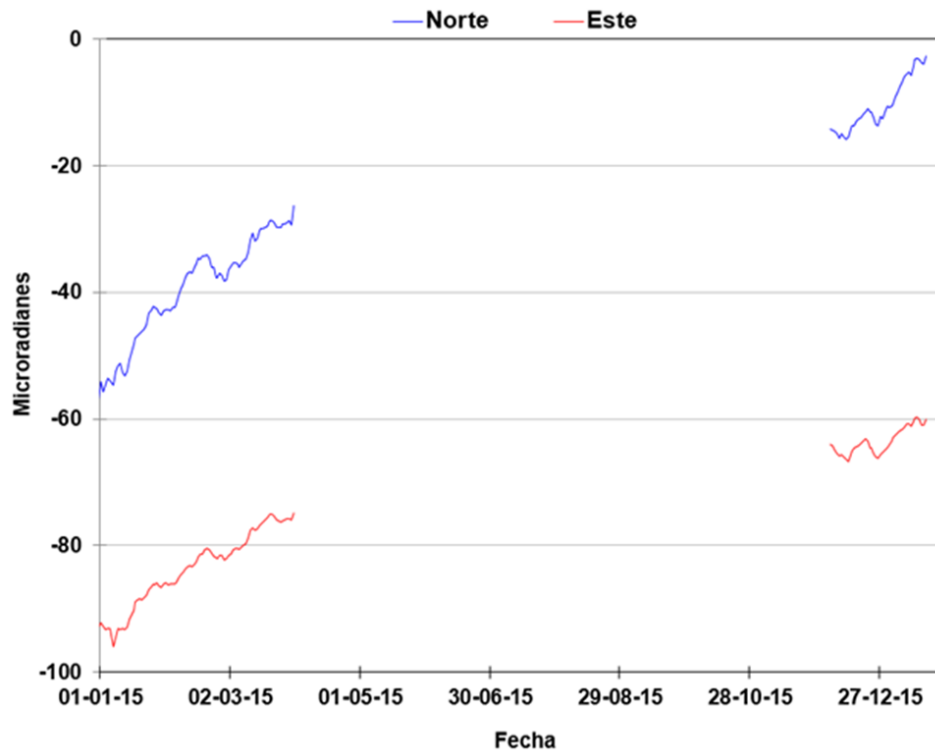


Figura 98. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Rojo) del inclinómetro electrónico CBRA, de la red de deformación del volcán Cerro Bravo durante 2015.

5. VOLCÁN PARAMILLO DE SANTA ROSA (VPSR)

5.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red telemétrica para este volcán durante el año 2015 fue del **71.6%**. Durante este año se destaca la instalación de un repetidor telemétrico en la estación de banda ancha PARAMILLO para recibir y concentrar la información de la estación sísmica de AFRICA y el GPS OTUN.

5.2 SISMOLOGÍA

Durante el año 2015, el Volcán Paramillo de Santa Rosa (VPSR) presentó actividad sísmica de baja energía asociada a fracturamiento de roca. El incremento de sismicidad que este volcán comenzó a presentar a partir de Febrero de 2014 y que se mantuvo por los siguientes meses, mostró un notorio decrecimiento en el número y energía de los sismos registrados a lo largo del año 2015.

5.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

La red de estaciones sismológicas (Figura 99) registró 341 eventos sísmicos tipo VT en el VPSR, la mayoría de ellos de baja energía (Figura 100 y Figura 101). Este número representa una disminución importante con respecto al total registrado durante el año 2014, cuando se alcanzó un número de 1023 sismos. La tasa diaria de sismicidad, en general, se mantuvo muy baja y registró el máximo el día 28 de Septiembre de 2015, con la ocurrencia de 14 eventos en ese día. La mayor liberación de energía, se produjo el día 02 de Febrero de 2015, con el registro de un VT de magnitud 2.0 M_L (Magnitud Local) a las 09:21 (hora local) catalogado como el de mayor magnitud durante el año 2015. No se presentaron enjambres sísmicos.

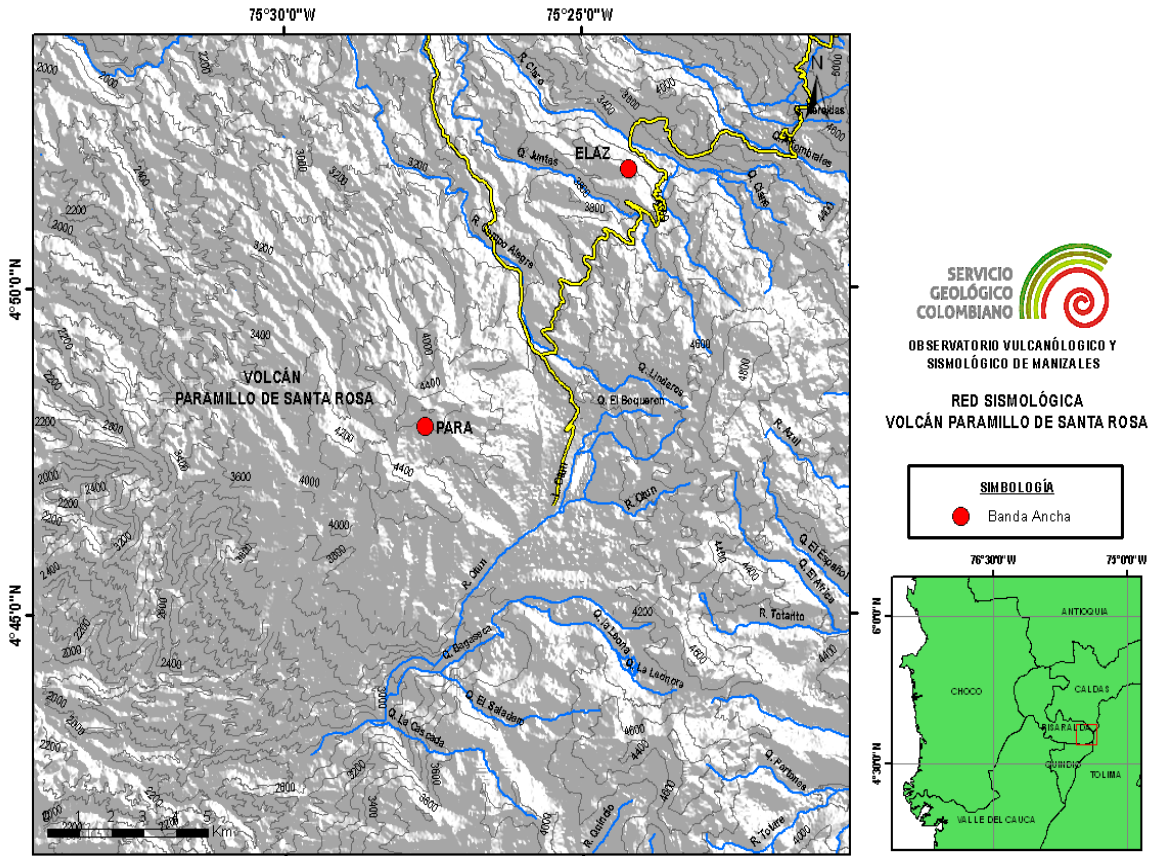


Figura 99. Red Sismológica. Volcán Paramillo de Santa Rosa.

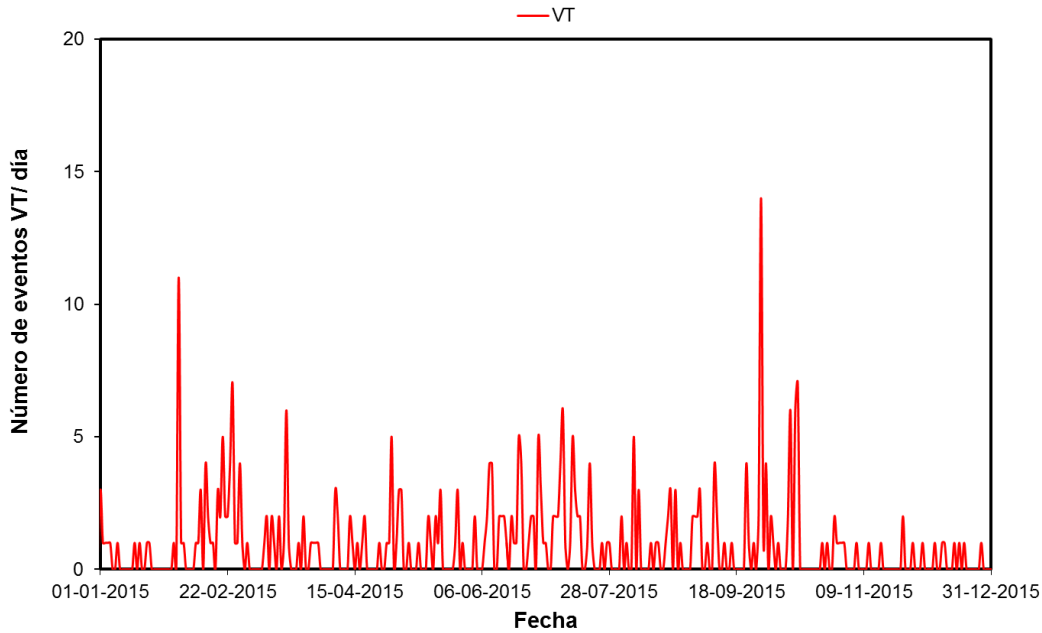


Figura 100. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el año 2015 en el VPSR.

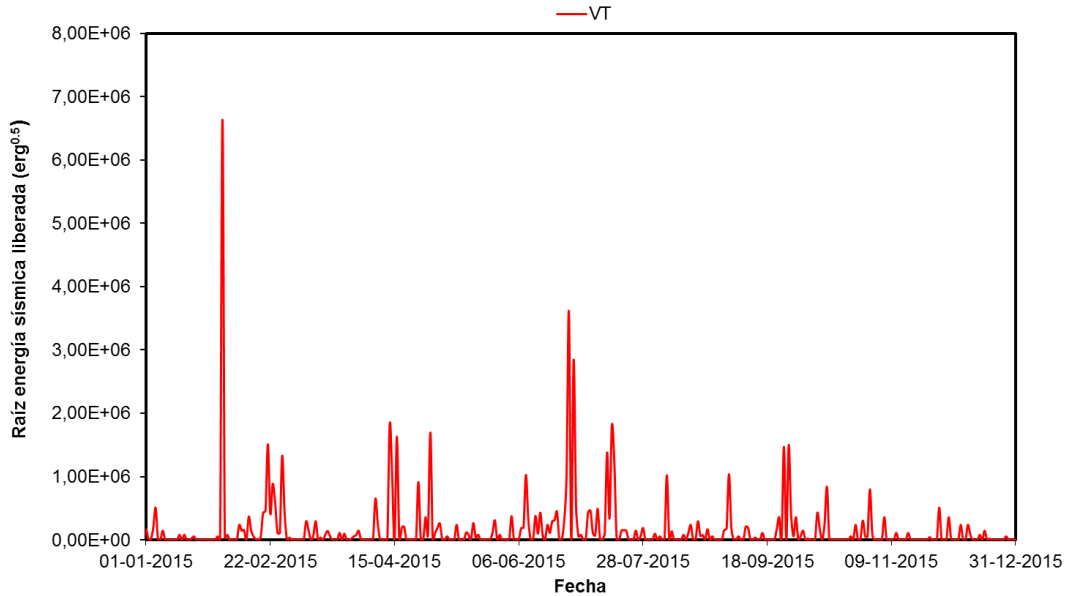


Figura 101. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el año 2015, en el VPSR.

Debido a la baja magnitud de los eventos, solo fue posible localizar el 35% de ellos. Estos sismos se localizaron principalmente al Norte y Noroccidente del edificio volcánico. Las profundidades de estos eventos oscilaron entre 2.54 y 13.63 km, presentando una concentración mayor entre 4.0 y 8.0 km (Figura 102).

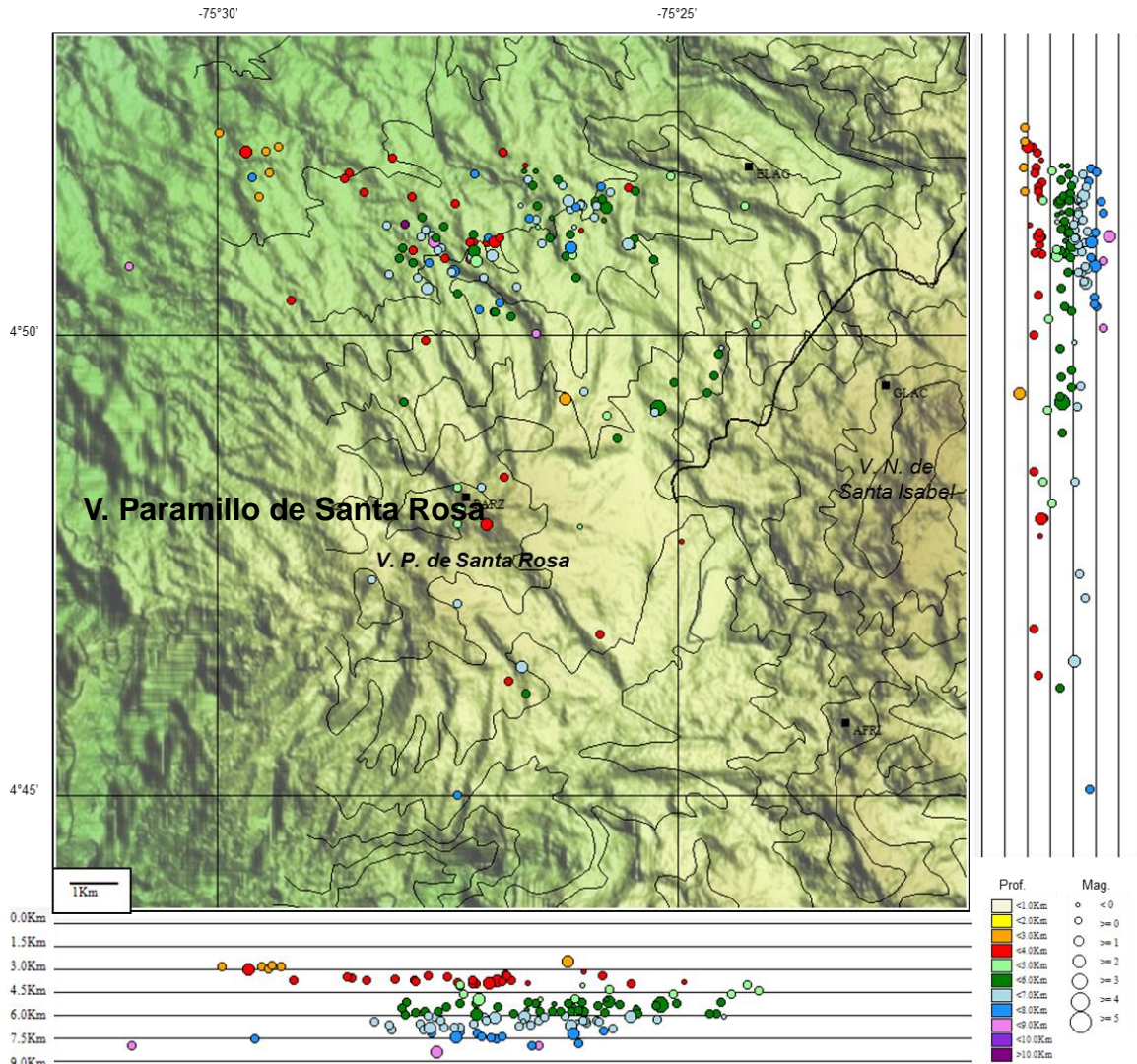


Figura 102. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPSR, durante el año 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas.

5.3 GEOQUÍMICA

En Junio del 2015 se realizó una visita a los manantiales termales aledaños a los Balnearios SAN VICENTE (SV), SANTA ROSA y SANTA ELENA (SE) pertenecientes al Volcán Paramillo de Santa Rosa.

5.3.1 Manantiales termales SAN VICENTE

En el Balneario SAN VICENTE se realizó monitoreo de 5 nacimientos termales (SVP5, SVP7, SVP8, SVP9 y SVP10), en general el comportamiento fisicoquímico de las aguas provenientes de los manantiales termales fue estable respecto a la última medida del 2014. En la Figura 103 se aprecia como la temperatura varió en ± 2 grados, excepto para el punto SVP5 en donde la variación fue de más de 8 °C, esto pudo ser debido a que al lado del nacimiento hay un Lago termal y cuando no hay contacto con éste la temperatura es estable en 80 °C, pero cuando canalizan el agua del Lago termal la temperatura tiende a disminuir notoriamente.

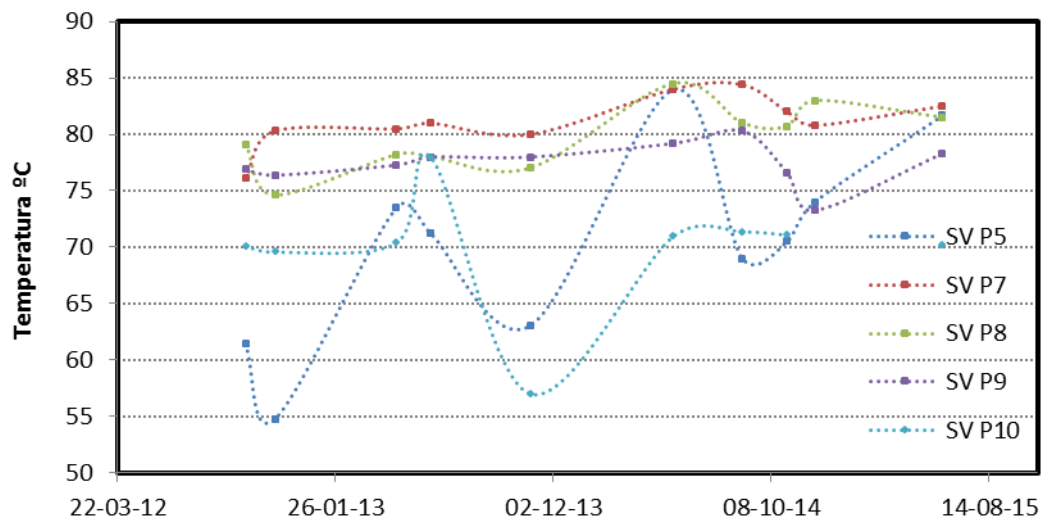


Figura 103. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

Respecto al potencial de hidrógeno, no se presentaron variaciones importantes respecto a las medidas del año anterior, los pH se mantienen dentro de la línea de la neutralidad. En la Figura 104 se presenta la variación del pH con el tiempo para los nacimientos termales.

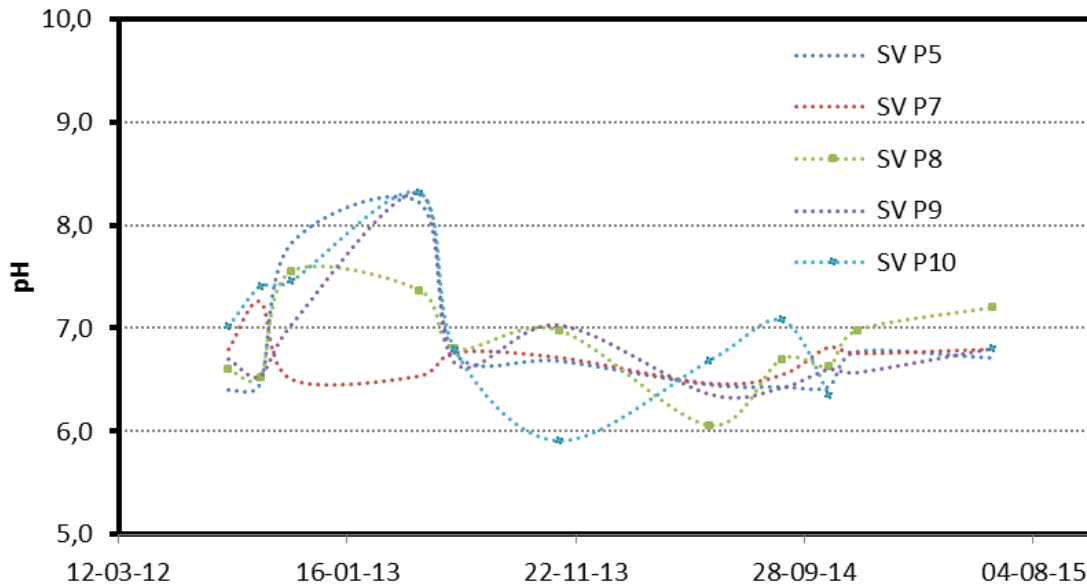


Figura 104. Variación del pH en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

El otro parámetro fisicoquímico medido fue la conductividad eléctrica, de acuerdo a las últimas medidas no se registran cambios importantes, no obstante la conductividad eléctrica es un parámetro que puede verse afectado por contribución de agua meteórica, por ello se aprecian algunos picos en el año 2014.

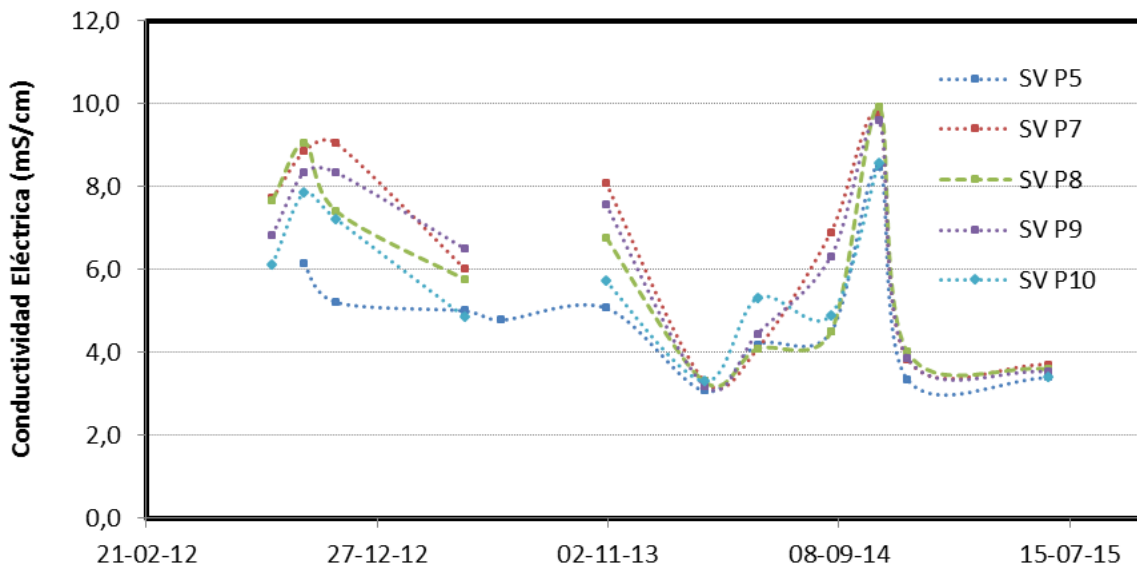


Figura 105. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SAN VICENTE. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

5.3.2 Manantiales termales SANTA ELENA

En el Balneario SANTA ELENA se realizó monitoreo de 4 nacimientos termales denominados: SEP1, SEP2, SEP3 y SEP4. Durante las medidas realizadas no se presentaron cambios importantes en los parámetros fisicoquímicos de los manantiales. En la Figura 106 se presenta la variación de la temperatura con el tiempo, allí se aprecia una variación entre 2 y 3 °C respecto a los datos medidos en el año anterior.

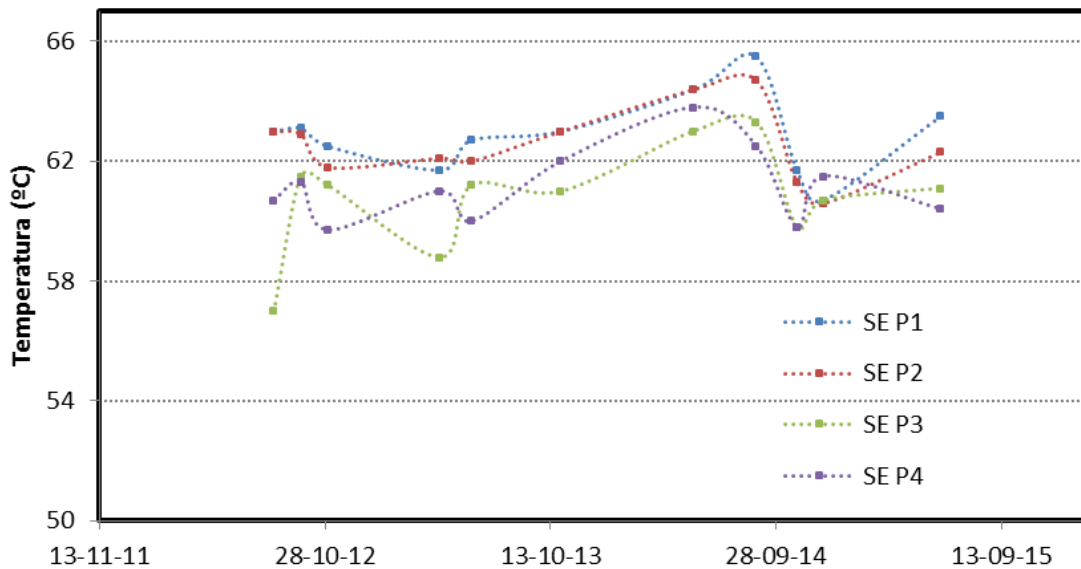


Figura 106. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

El Potencial de Hidrógeno y la Conductividad Eléctrica medidos en los nacimientos termales aledaños a SANTA ELENA se mantuvieron constantes respecto a las medidas anteriores, el pH sigue considerándose dentro de la línea de neutralidad (Figura 107) y no ha tenido cambios importantes en los últimos años. La conductividad eléctrica registrada en los nacimientos al igual que el pH se mantuvo estable muy cercana a las 2.5 mS/cm, la variación de la conductividad eléctrica con el tiempo se presenta en la Figura 108.

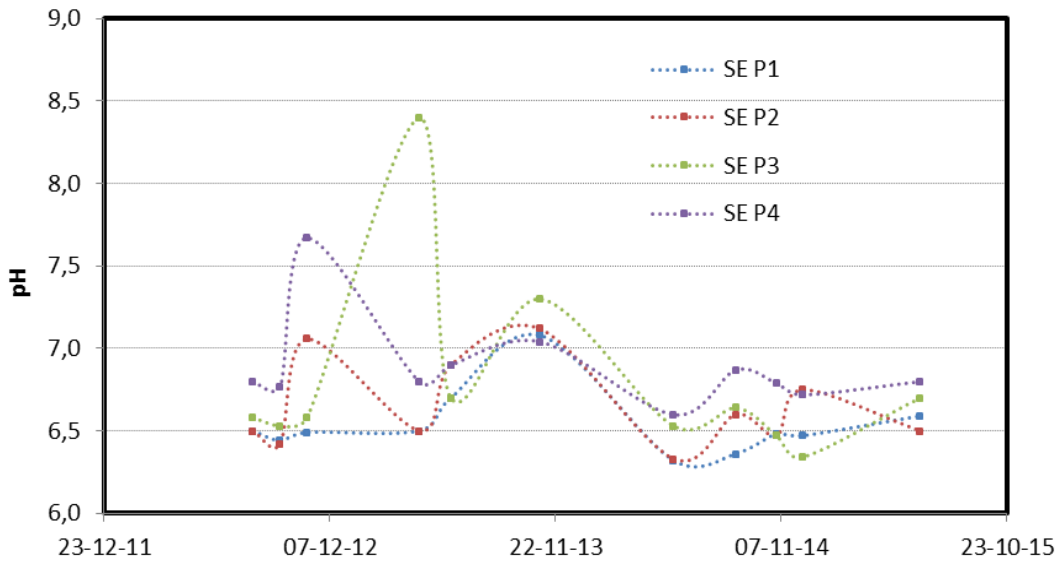


Figura 107. Variación del pH en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

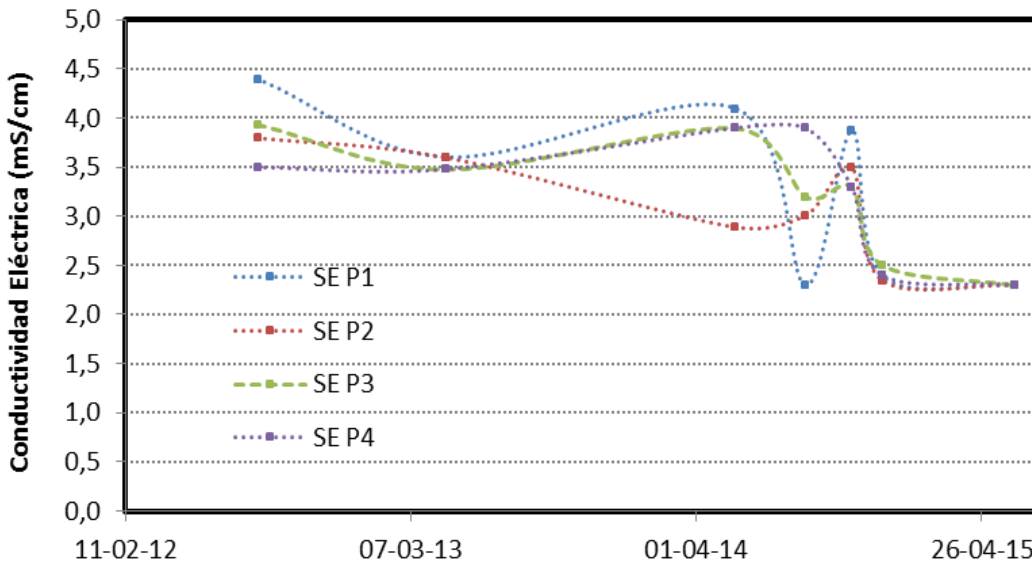


Figura 108. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SANTA ELENA. Volcán Paramillo de Santa Rosa 2015.

5.3.3 Manantiales termales SANTA ROSA

El monitoreo de los nacimientos termales aledaños al Balneario SANTA ROSA se realizó en los sitios denominados: CALDERO, POZO DESEOS y LA CUEVA. Los parámetros fisicoquímicos medidos en los manantiales no presentaron variaciones importantes respecto a las variables medidas en el año anterior. La variación de la temperatura que se presenta en la Figura 109 mostró una variación de 2 °C respecto a la última lectura

registrada en el 2014 en los 3 nacimientos.

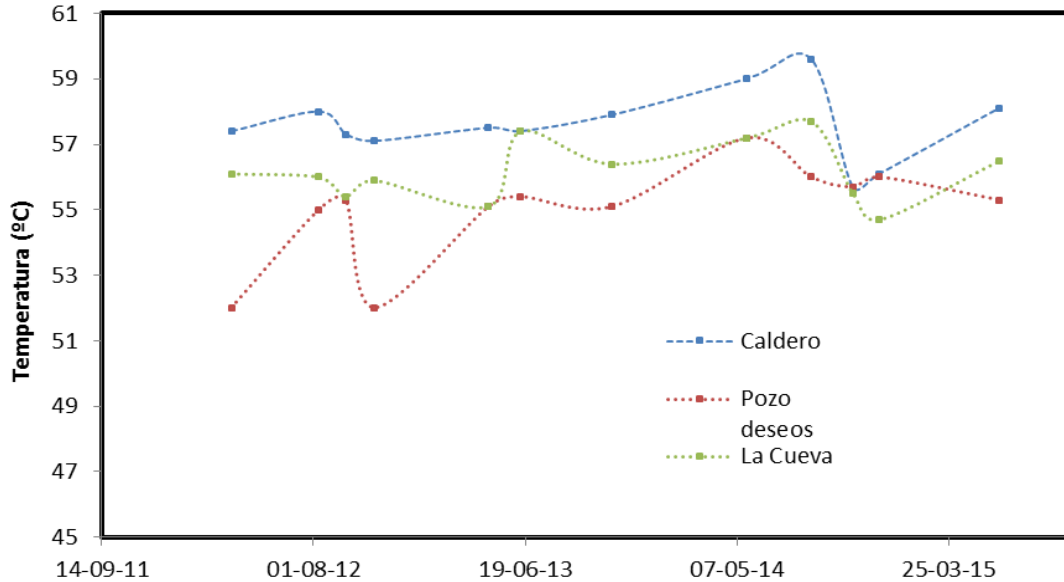


Figura 109. Variación de la Temperatura en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

La variación del Potencial de Hidrógeno con el tiempo para los nacimientos termales de SANTA ROSA se presenta en la Figura 110, allí se aprecia que el pH para los 3 nacimientos se mantuvo entre 6.2 – 6.5. La conductividad eléctrica presentó algunas variaciones respecto a las medidas del año anterior, sus valores fueron menores, esto pudo ser debido a que en las medidas anteriores hubo posibles mezclas con agua meteórica que modificó la cantidad de iones en solución o se presentó mayor precipitación de material sólido que hizo que se afectará la medida de conductividad (Figura 111).

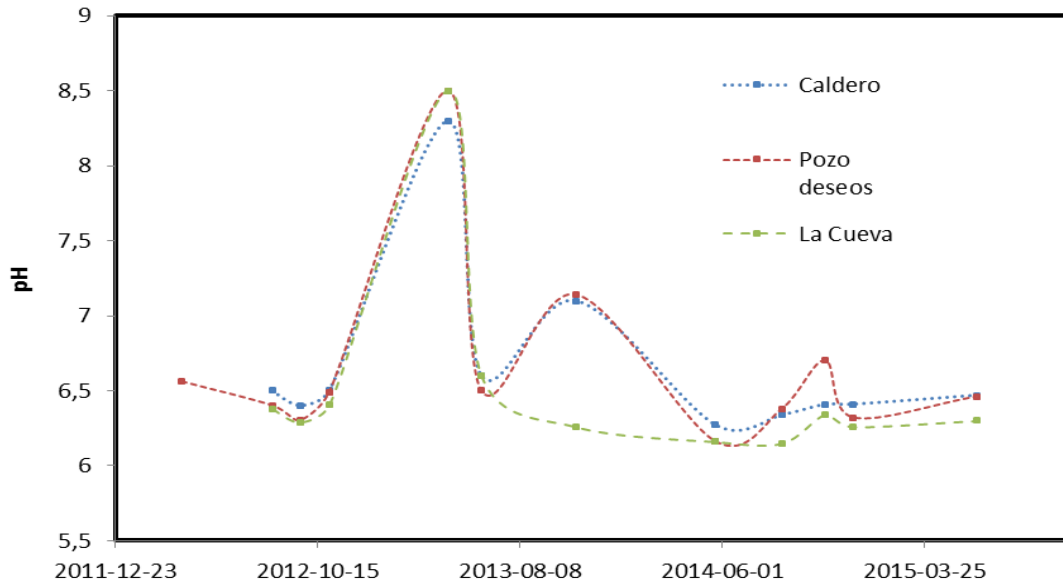


Figura 110. Variación del pH en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

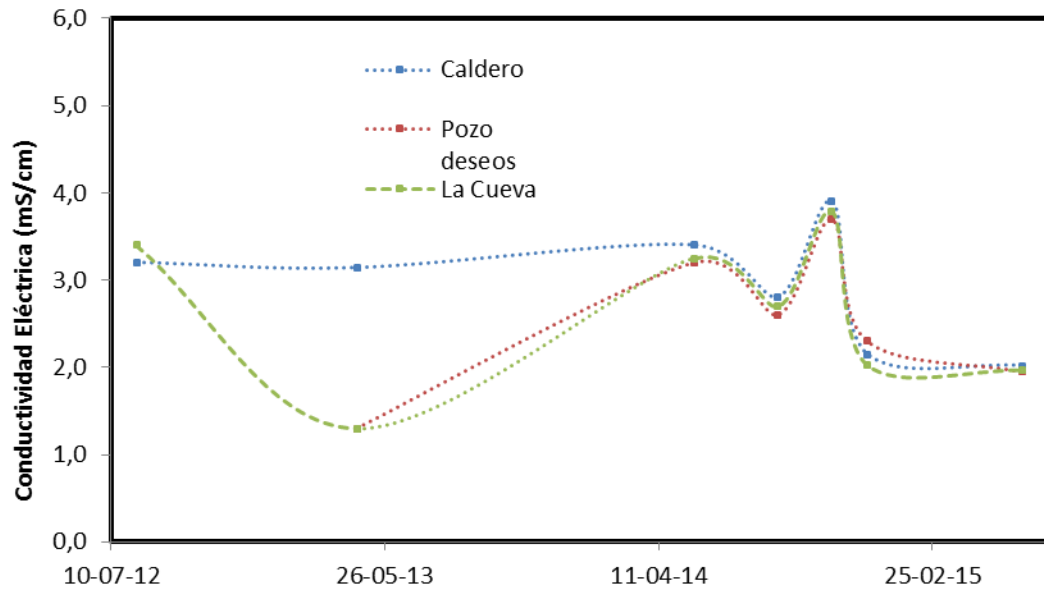


Figura 111. Variación de la Conductividad Eléctrica en manantiales termales Balneario SANTA ROSA. Volcán Paramillo de Santa Rosa. 2015.

6. VOLCÁN NEVADO DE SANTA ISABEL (VNSI)

6.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación de la red de vigilancia telemétrica para este volcán durante el año 2015 fue del **95.0%**. Durante este año se destaca el aumento en la red de monitoreo, con la instalación de dos nuevas estaciones de banda ancha triaxial LAGUNA VERDE (Figura 112) y AFRICA (Figura 113), así como la instalación de una estación GPS en la LAGUNA DEL OTUN (Figura 113).



Figura 112. Instalación estación sismologica LAGUNA VERDE. Volcan Nevado de Santa Isabel.



Figura 113. Instalación estación sísmica AFRICA. Volcán Nevado de Santa Isabel.



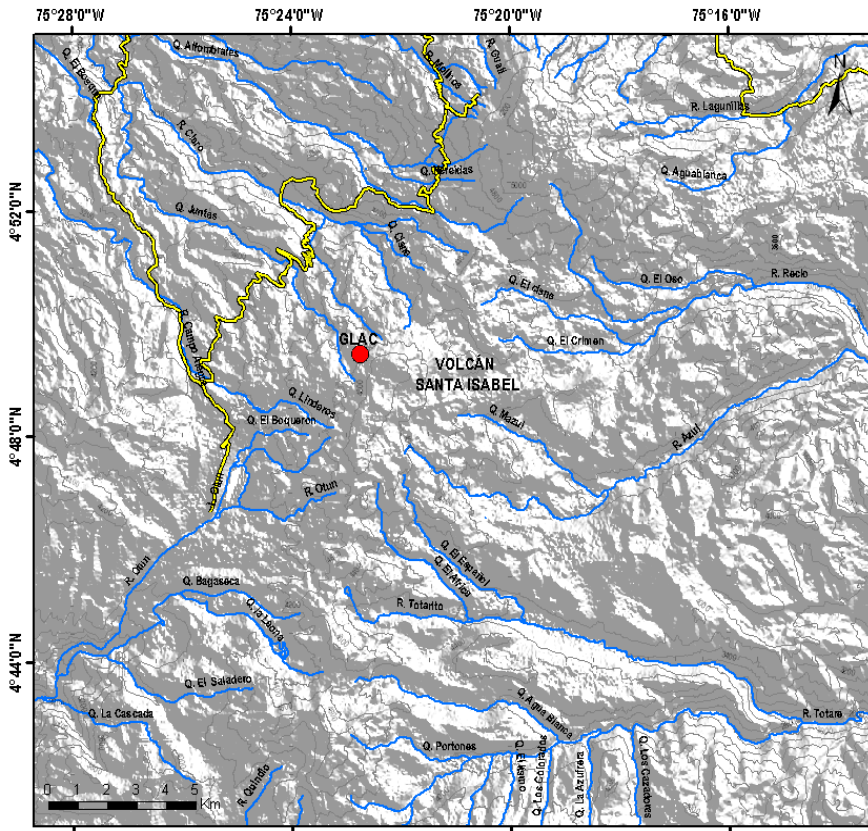
Figura 114. Instalación estación GPS OTUN. Volcán Nevado de Santa Isabel.

6.2 SISMOLOGÍA

Durante el año 2015 el Volcán Nevado de Santa Isabel (VNSI) continuó presentando actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, mostrando una disminución en la actividad con respecto al año anterior.

6.2.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

La red de estaciones sismológicas (Figura 115), registró un total de 978 eventos sísmicos tipo VT (Figura 116 y Figura 117). Los sismos se localizaron principalmente al suroccidente, al occidente, en el flanco Norte y en menor medida al Noroccidente y al Oriente cercano y distal de la estructura volcánica, a profundidades entre 1.53 y 7.23 km (Figura 118). La máxima magnitud registrada fue de 1.7 M_L (Magnitud Local), correspondiente al sismo del día 17 de Enero a las 12:11 (hora local), en el sector Noroccidental de la estructura volcánica a una profundidad de 4.56 km. Se destacan en el año tres incrementos de más de 90 sismos, como se observa en la gráfica de número de eventos por día (Figura 116) los días 17 de enero, 01 de Julio y 05 de Noviembre. Dos de estos incrementos también marcaron picos importantes de energía liberada como se observa en la gráfica de Energía (Figura 117).



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO DE MANIZALES
RED SISMOLÓGICA VOLCÁN SANTA ISABEL

SIMBOLOGÍA
● Banda Ancha

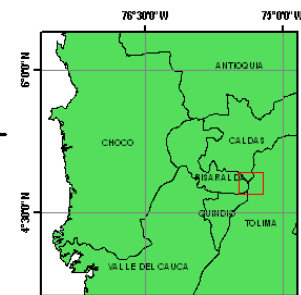


Figura 115. Red Sismológica. Volcán Nevado de Santa Isabel.

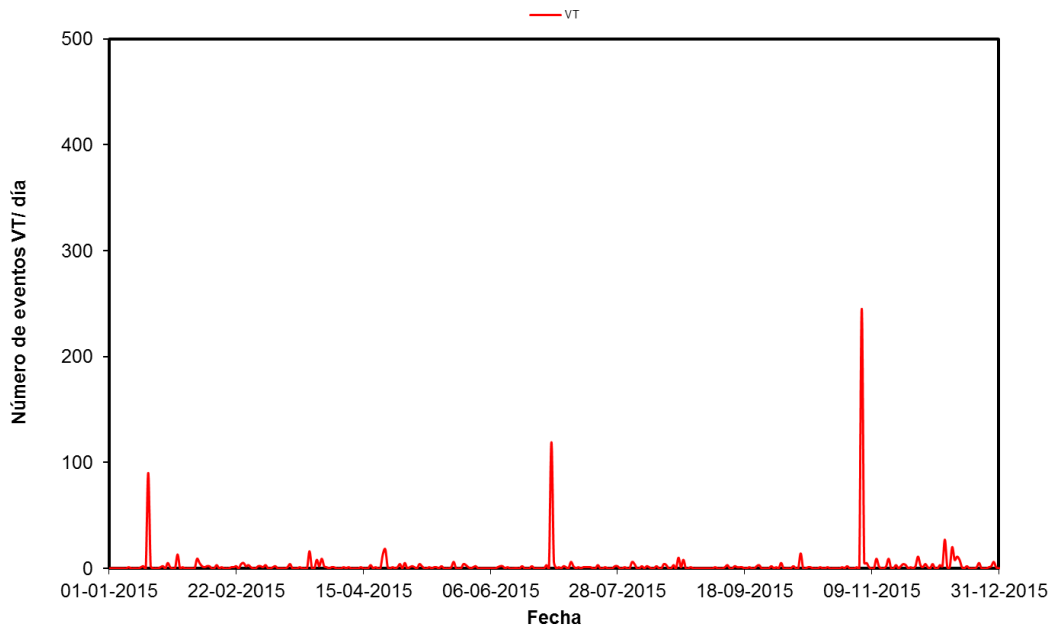


Figura 116. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios, ocurridos durante el 2015 en el VNSI.

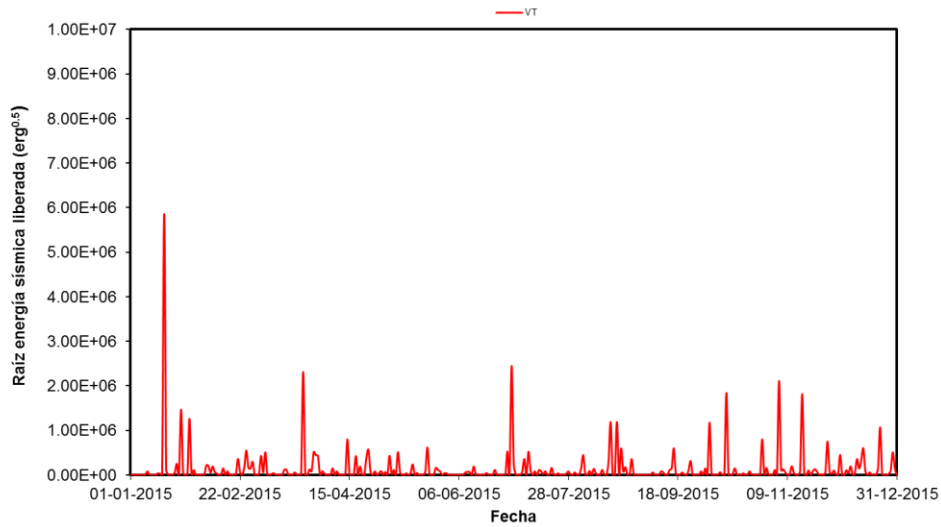


Figura 117. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2015, en el VNSI.

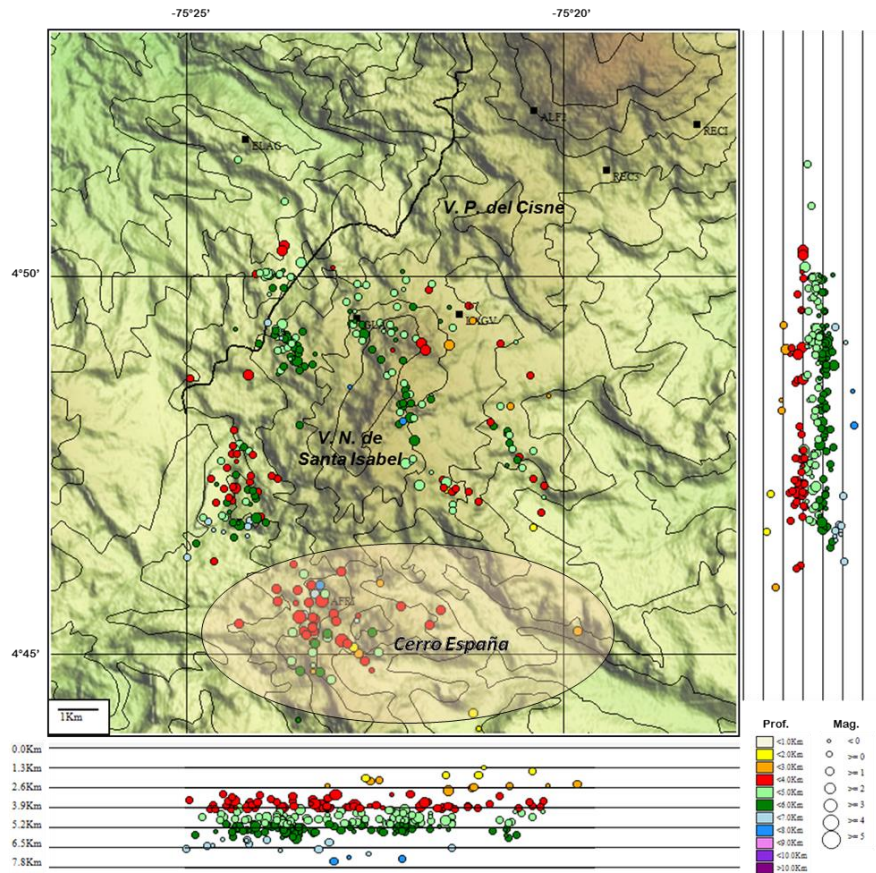


Figura 118. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VNSI y el sector de Cerro España, durante el 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas.

En la zona Sur del Volcán Nevado de Santa Isabel, en el sector conocido como Cerro España se registró actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca, alcanzándose una cantidad de 224 eventos registrados (Figura 119 y Figura 120). Los eventos estuvieron localizados principalmente al Occidente de la estructura y en menor proporción al Oriente, entre 1.34 y 7.38 km de profundidad. La máxima magnitud registrada fue de 1.9 M_L (Magnitud Local), correspondiente al sismo del día 19 de Marzo a las 13:01 (hora local) a una profundidad de 3.73 km. En el círculo de la Figura 117 se destaca la localización de la actividad sísmica asociada al Cerro España.

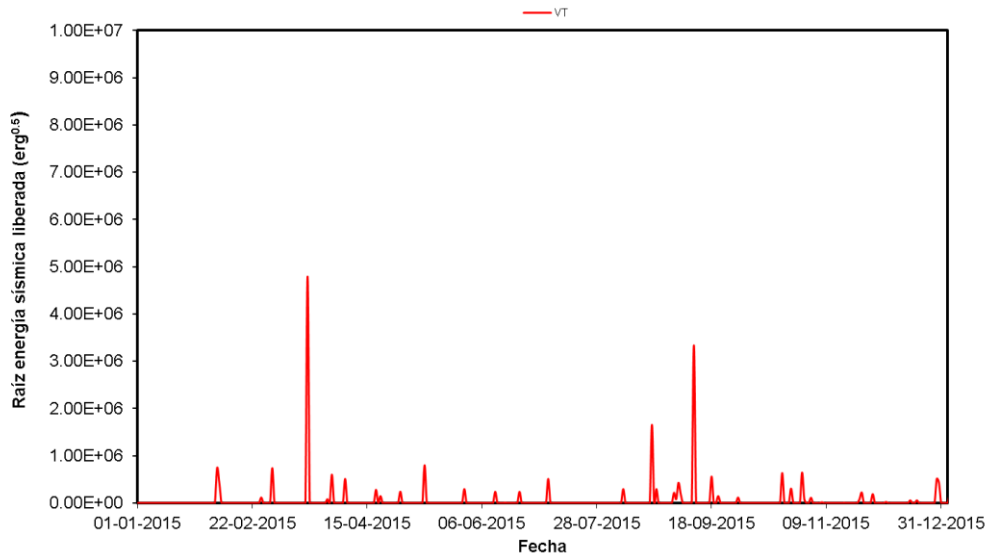


Figura 119. Número diario de eventos sísmicos tipo VT ocurridos durante el 2015 en el Cerro España.

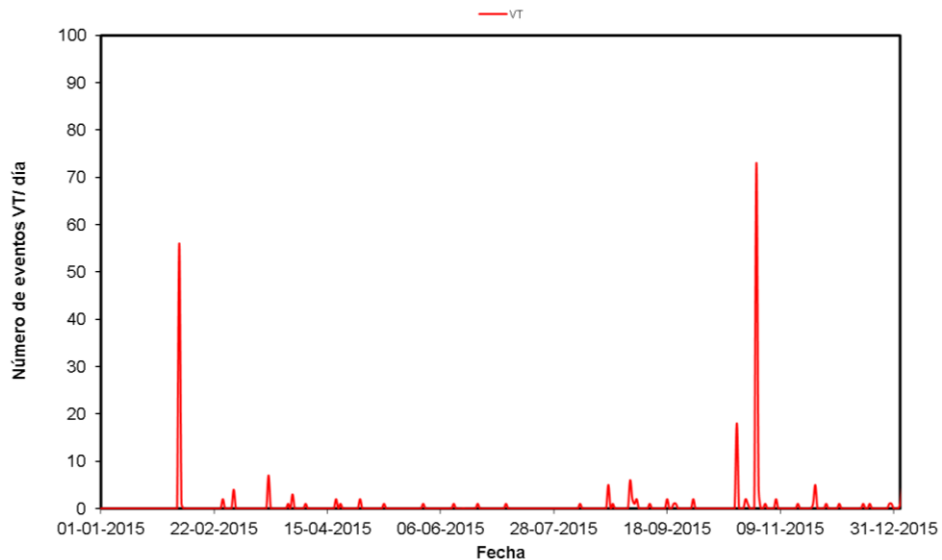


Figura 120. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2015, en el Cerro España.

6.2.2 Señales asociadas a la actividad glaciár

Adicionalmente, a la actividad sísmica de origen volcánico, la red de estaciones del volcán registró señales sísmicas asociadas a la dinámica del glaciar y pequeñas avalanchas de hielo y roca. A lo largo del año 2015, el número de estos eventos presentó un aumento, respecto al 2014, debido al cambio en las condiciones meteorológicas de zona.

6.3 DEFORMACIÓN

Durante 2015 se contó con la operación de los dos inclinómetros electrónicos CHAV y GLAC instalados al noroccidente y occidente del volcán respectivamente. La Figura 121 muestra la red de deformación del Volcán Nevado Santa Isabel.

Las dos estaciones mostraron pequeñas fluctuaciones diarias asociadas a los cambios de temperatura. El Inclinómetro electrónico CHAV mostró una clara tendencia de estabilidad (Figura 122). El Inclinómetro GLAC mantuvo estabilidad hasta Octubre de 2015, fecha en la cual empezó a registrar una deformación importante hasta Diciembre de 2015 que puede estar relacionada con un proceso local (Figura 123).

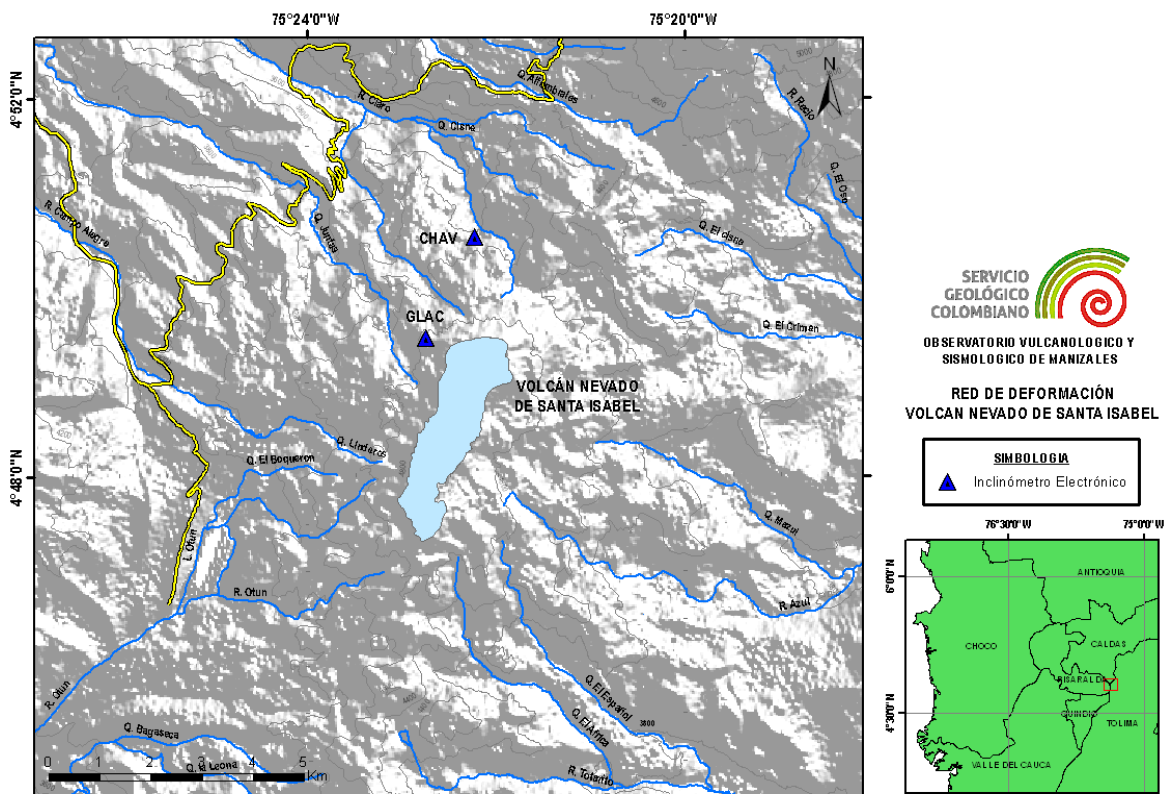


Figura 121. Red de deformación. Volcán Nevado de Santa Isabel.

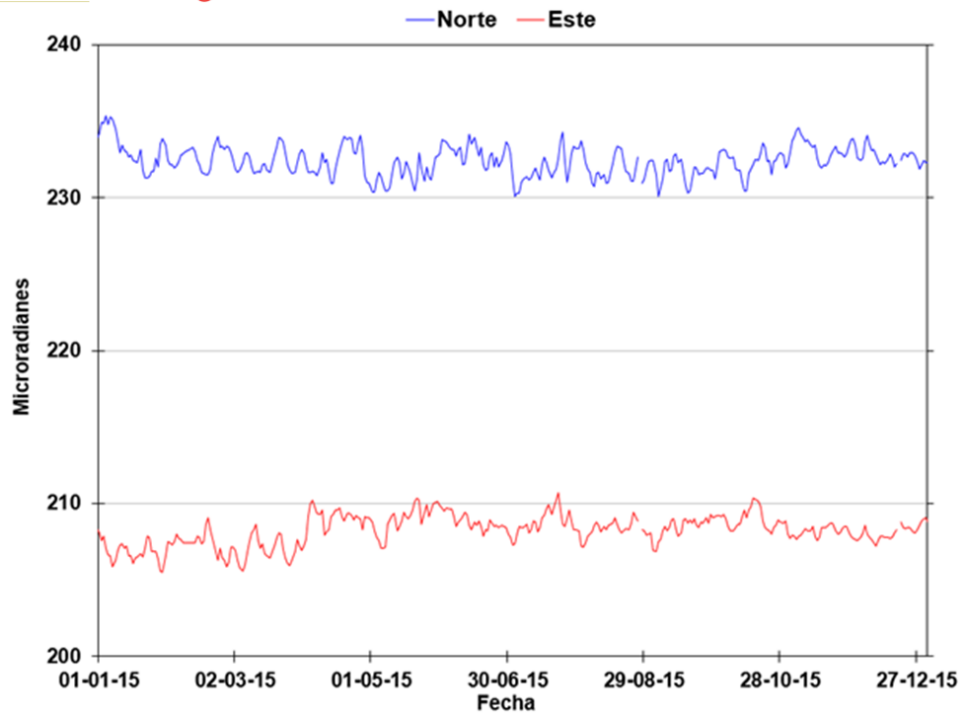


Figura 122. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Rojo) del inclinómetro electrónico CHAV de la red de deformación del VNSI hasta Diciembre de 2015.

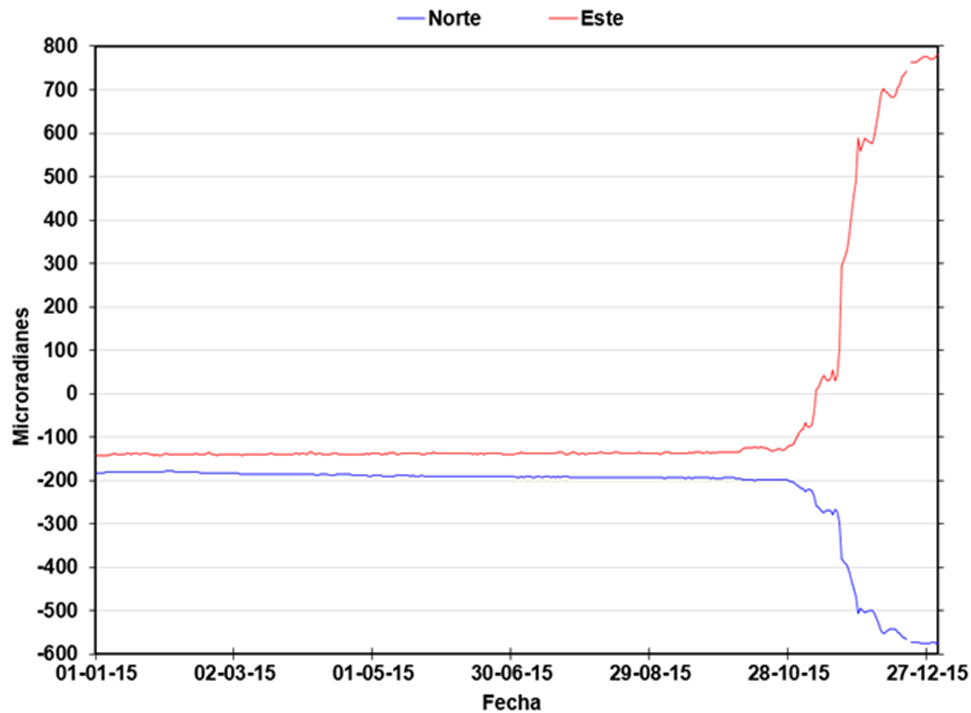


Figura 123. Comportamiento de las componentes Norte (Azul) y Este (Rojo) del inclinómetro electrónico GLAC, de la red de deformación del VNSI hasta Diciembre de 2015.

7. VOLCÁN PARAMILLO DEL CISNE (VPC)

7.1 SISMOLOGÍA

El Volcán Paramillo del Cisne (VPC) continuó durante el 2015 presentando actividad sísmica principalmente asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, mostrando un aumento con respecto al año anterior. Un total de 1780 señales sísmicas tipo VT (Figura 124 y Figura 125) y 05 sismos de tipo híbrido registrados por primera vez en el edificio volcánico fueron registrados durante el año.

7.1.1 Sismos volcano-tectónicos (VT)

Los sismos tipo VT asociados a fracturamiento de roca en la estructura volcánica, se registraron durante el 2015 en una proporción y niveles energéticos mayores con respecto al año anterior (Figura 124 y Figura 125). Esta actividad sísmica estuvo localizada alrededor del edificio volcánico y sectores próximos a éste, a profundidades que oscilaron entre 1.7 y 7.7 km (Figura 125).

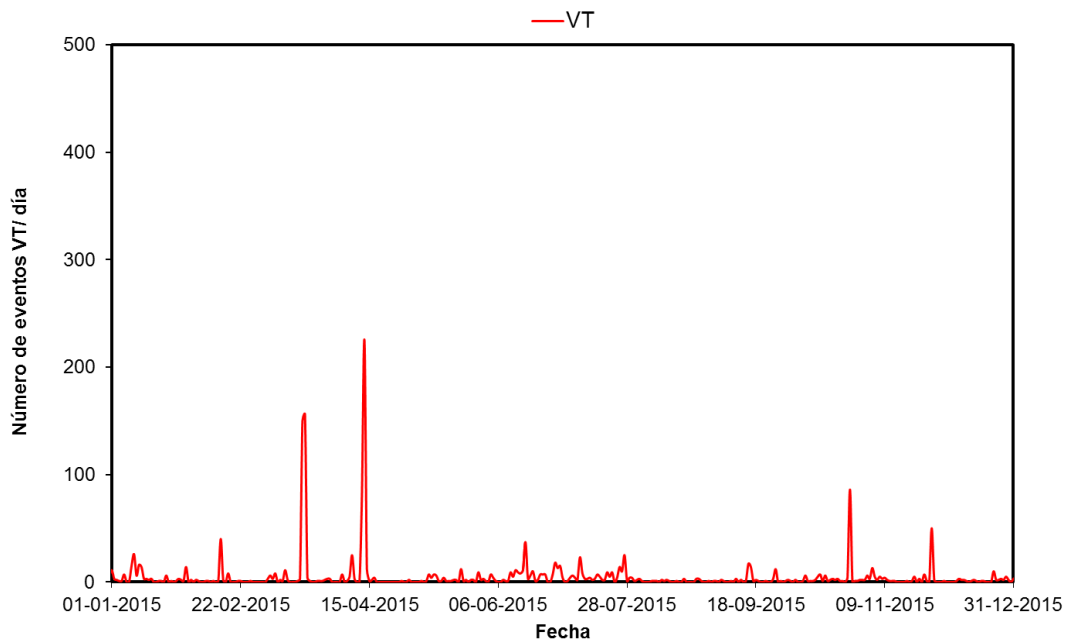


Figura 124. Número de eventos sísmicos tipo VT diarios registrados en el Volcán Paramillo del Cisne durante el 2015.

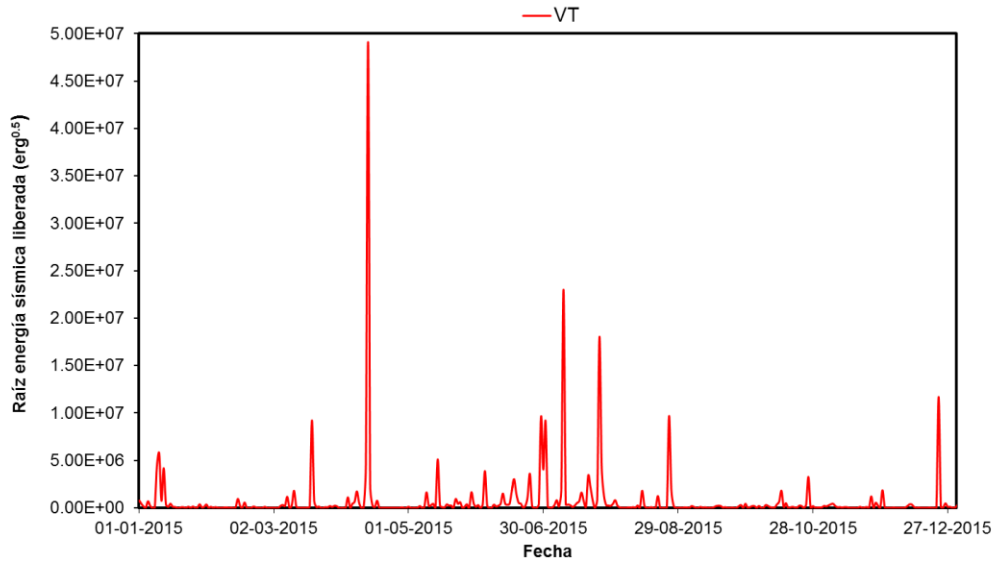


Figura 125. Raíz de la energía sísmica diaria liberada por eventos tipo VT en el Volcán Paramillo del Cisne durante el 2015.

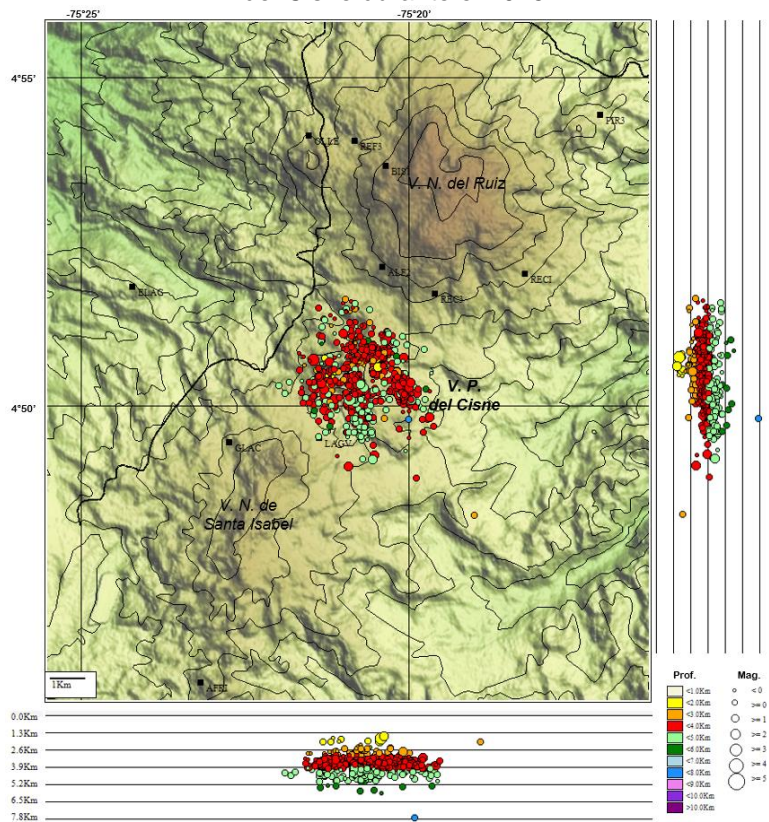


Figura 126. Mapa de localización hipocentral de eventos sísmicos tipo VT (círculos de colores) registrados en el Volcán Paramillo del Cisne durante el año 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas instaladas en el área. Líneas rojas corresponden a los rasgos estructurales más relevantes.

Varios incrementos en la sismicidad fueron registrados en el volcán Paramillo del Cisne durante el 2015, entre los que se destaca el incremento sísmico del día 13 Abril por su número y energía sísmica liberada. Durante este incremento se registraron 225 sismos tipo VT en el sector Suroriente de la estructura volcánica a profundidades entre 2.8 y 4.7 km (Figura 127). La máxima magnitud local registrada durante el incremento y la cual corresponde a la máxima magnitud registrada durante el año fue de 2.9 M_L , correspondiente con el evento registrado a la 01:00 (hora local) en el sector Suroriente a una profundidad de 3.2 km.

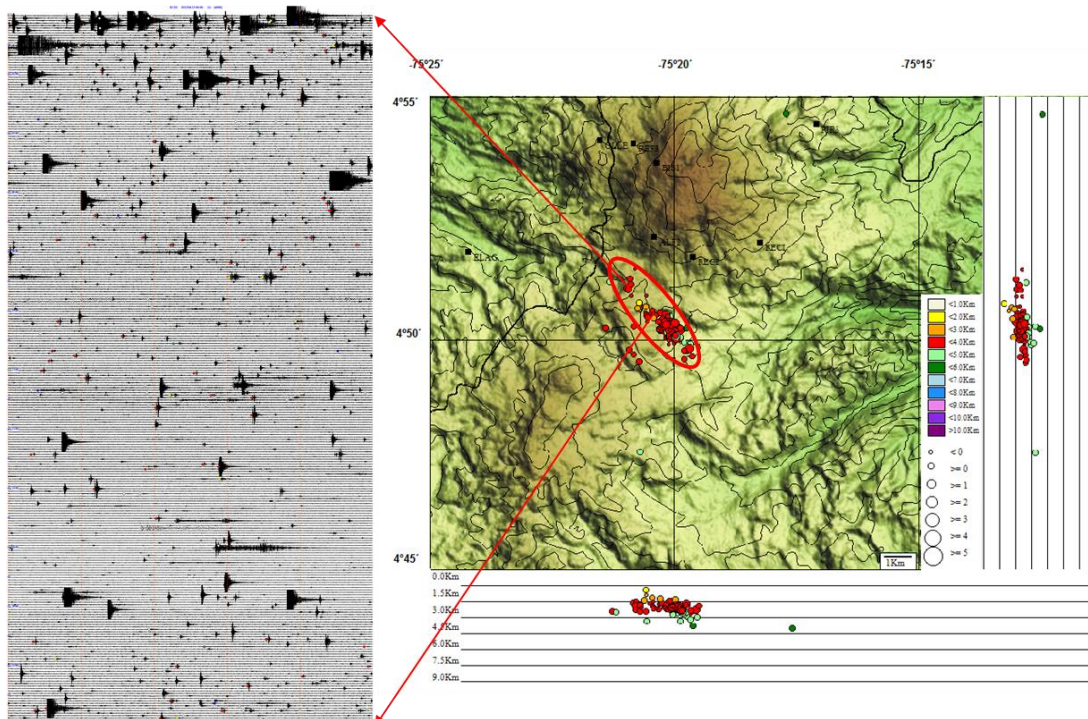


Figura 127. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPC, durante el mes de Abril de 2015 y sismograma asociado con el incremento en la actividad durante el 13 de Abril.

7.1.2 Sismos Híbridos (VT)

Por primera vez de manera instrumental en el VPC se registra señales sísmicas tipo híbrido (HB, tipo de sismo que combina las características de un sismo tipo VT y de un sismo tipo LP). Los sismos tipo HB registrados durante el año 2015 en el edificio volcánico del VPC fueron 5 sismos. Este tipo de actividad se registró en el mes de Octubre a profundidades entre 1.7 y 2.8 km. La mayoría de estos sismos presentaron magnitudes importantes, el sismo tipo HB de mayor magnitud fue de 2.7, registrado el día 11 de Octubre a las 07:10 (hora local) a una profundidad de 1.7 km (Figura 128). Dos de estos sismos, registrados el día 11 de Octubre, fueron antecesores de un incremento de nivel energético importante ocurrido en el Volcán Nevado del Ruiz entre las 08:00 y 10:00

(hora local) (Figura 11).

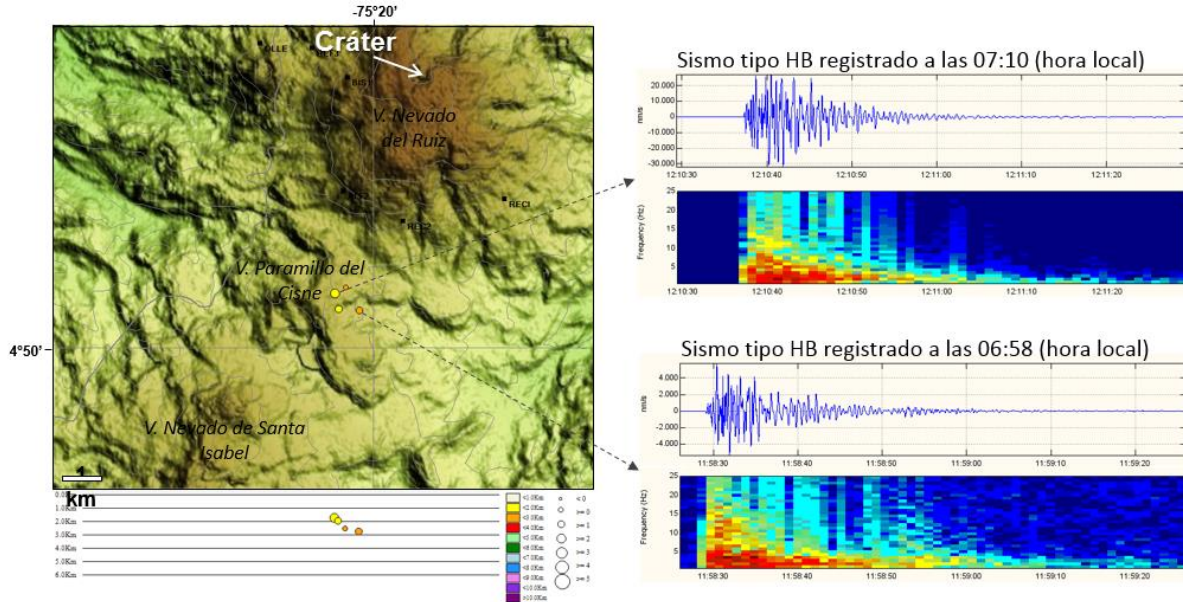


Figura 128. Mapa de localización hipocentral de los sismos híbridos (círculos de colores) registrados en la estructura volcánica del VPC, durante el mes de Octubre de 2015 (Izquierda). Formas de onda y espectrogramas de los sismos Híbridos registrados el día 11 de Octubre de 2015 (Derecha).

8. PARAMILLO DEL QUINDÍO (PQ)

8.1 SISMOLOGÍA

En el volcán Paramillo del Quindío, durante el 2015, la actividad sísmica aumentó respecto al 2014, tanto en número como energía liberada. Se presentaron 211 señales sísmicas asociadas con el fracturamiento de roca al interior del edificio volcánico (Figura 129 y Figura 130). Los sismos se localizaron principalmente al Occidente y al Noroccidente distal del edificio volcánico, y en menor medida en los alrededores del mismo, a profundidades entre 1.11 y 8.73 km (Figura 131). La mayor magnitud registrada fue de 1.7 M_L (Magnitud local) el 20 de Julio a las 09:46, localizado al Noroccidente de la estructura volcánica a una profundidad de 2.56 km.

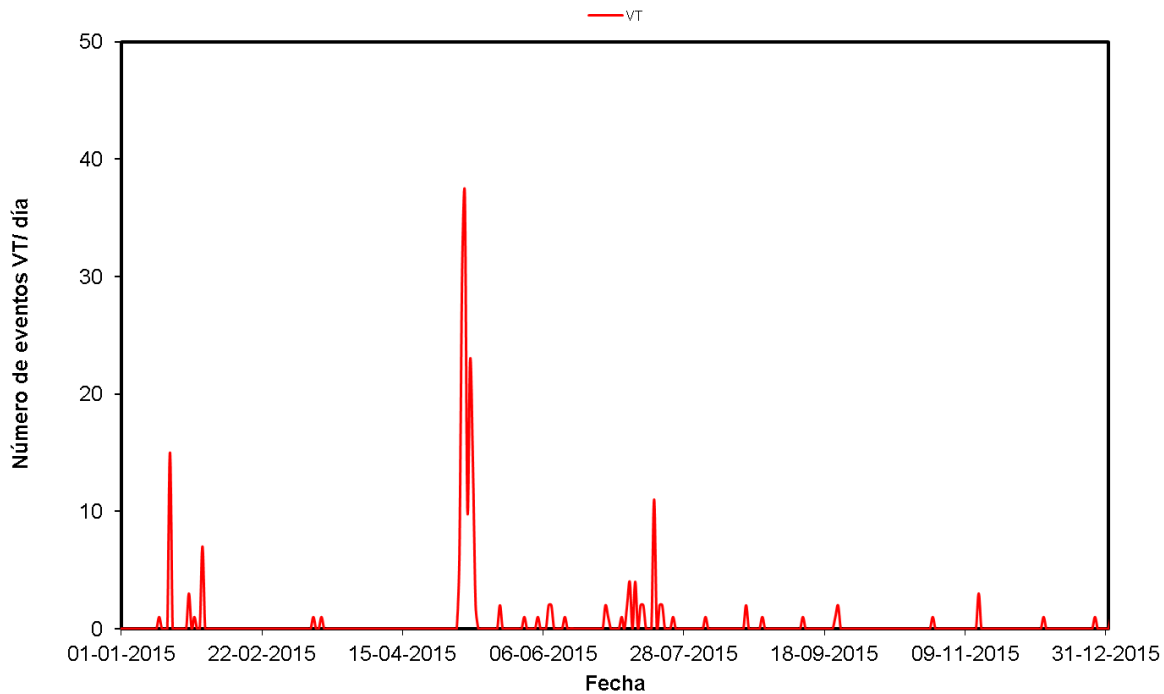


Figura 129. Número de eventos sísmicos diarios tipo VT, ocurridos durante el 2015 en el VPQ.

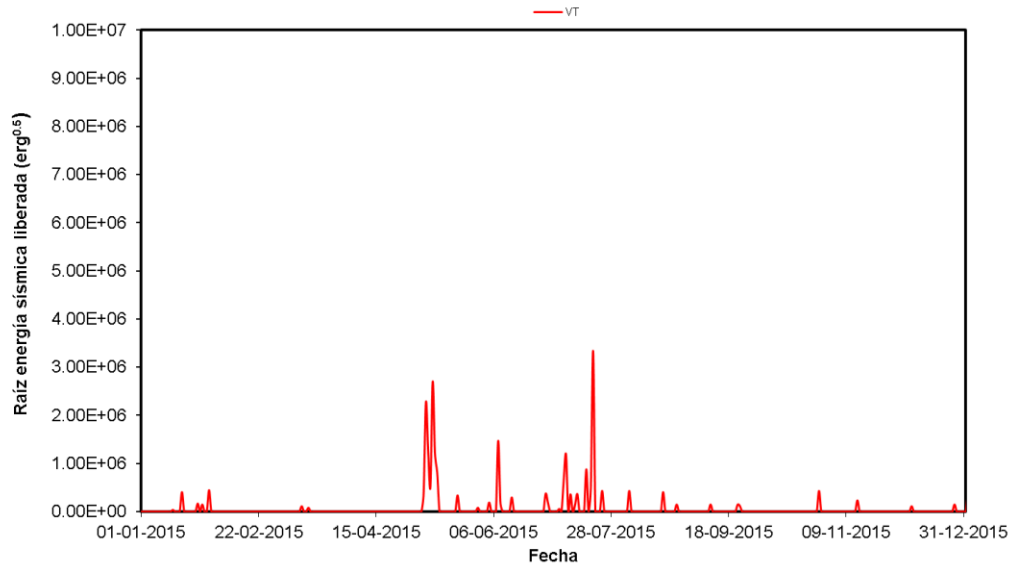


Figura 130. Raíz de la energía sísmica liberada diaria de los eventos sísmicos tipo VT registrados durante el 2015 en el VPQ.

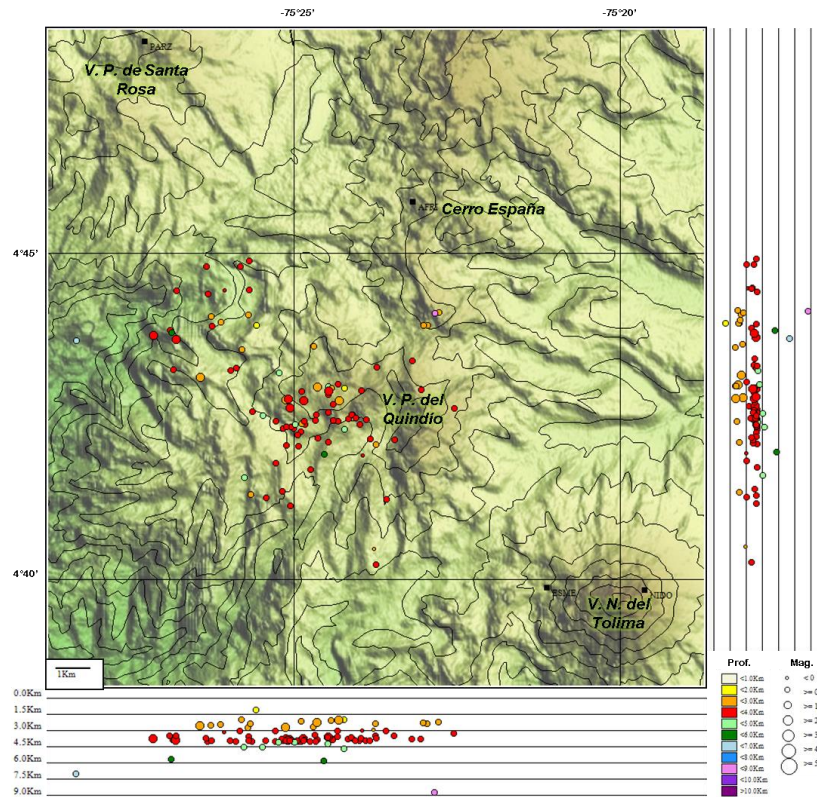


Figura 131. Mapa de localización hipocentral de los sismos volcano-tectónicos (círculos de colores) registrados en el área del VPQ, durante el 2015. Los cuadrados negros representan las estaciones sismológicas.

9. VOLCÁN SAN DIEGO

9.1 RED DE VIGILANCIA

La estación sismológica que opera en el área de influencia volcánica, continúa pendiente de re-direccionar su transmisión debido al hurto de su sistema de repetición en cercanías del municipio de Samaná, registrado en el año 2014.

9.2 SISMOLOGÍA

El volcán San Diego no presentó actividad sísmica durante el año 2015.

10. VOLCÁN ROMERAL

10.1 SISMOLOGÍA

El volcán de Romeral no presentó actividad sísmica durante el año 2015.

11. VOLCÁN EL ESCONDIDO (VE)

11.1 RED DE VIGILANCIA

El porcentaje de operación para la red de vigilancia de una estación portátil durante el año 2015 fue del **100%**. Durante este año se instaló una estación portátil triaxial de banda ancha en el Volcán el Escondido por un periodo de nueve meses llamada el HOYO (Figura 132).



Figura 132. Instalación de estación portátil el HOYO. Volcan El Escondido

11.2 GEOQUÍMICA

Los días 22, 23 y 24 de Abril 2015 se realizó una comisión al Volcán El Escondido, el objetivo de esta comisión fue realizar reconocimiento, medidas in situ y muestreo de los manantiales termales aledaños al Volcán. Los parámetros fisicoquímicos fueron medidos con un equipo Multiparamétrico Thermo Scientific Orion star A325. Los análisis de aniones que se presentan fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica de Volcanes del Observatorio Vulcanológico de Manizales utilizando un Equipo Cromatógrafo Iónico Metrohm 850.

En la Figura 132 se aprecia una fotografía del Manantial Termal Santa Marta, el cual se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas: 5° 32' 10.1" Latitud N; 75° 24.3' 0.1" Longitud W y 1122 msnm. En la Tabla 10 se muestran los resultados de las medidas fisicoquímicas in situ y la composición de aniones mayores. De acuerdo a los resultados obtenidos el agua proveniente de este manantial se clasifica como Agua Neutra Clorurada.



Figura 133. Manantial Termal Santa Marta. Volcán El Escondido. 2015

Tabla 10. Fisisicoquímica del agua del Manantial Termal Santa Marta. Volcán El Escondido.

Referencia	T °C	pH	Cond. mS/cm	Cl- mg/L	SO ₄ mg/L	F- mg/L	Br- mg/L	PO ₄ mg/L	NO ₃ mg/L
Manantial Santa Marta Punto 2	39.3	6.11	3.488	653.91	25.38	2.07	1.45	ND	NR
Manantial Santa Marta Punto 1	37.1	6.27	3.087	567.93	48.730	2.20	1.31	ND	NR

En la Figura 134 se presenta el sitio de toma de muestra del Manantial Termal Espíritu Santo, el cual se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas 5° 35' 10.2" Latitud N 75° 42' 7" Longitud W y a 704 msnm.

De acuerdo con los análisis químicos realizados y los parámetros fisisicoquímicos medidos in situ (Tabla 11) este manantial se clasifica como Agua Neutra Clorurada.



Figura 134. Manantial Termal Espíritu Santo. Volcán El Escondido. 2015

Tabla 11. Fisicoquímica del agua del Manantial Termal Espíritu Santo. Volcán El Escondido.

Referencia	T °C	pH	Cond. mS/cm	Cl- mg/L	SO ₄ mg/L	F- mg/L	Br- mg/L	PO ₄ mg/L	NO ₃ mg/L
Manantial Espíritu Santo Jacuzzi	35.5	6.12	3.705	627.89	385.58	2.33	1.37	ND	NR
Manantial Espíritu Santo Piscina	42.5	6.52	7.514	1379.51	845.07	2.76	2.62	ND	NR

ND: No detectado NR: No realizado

El tercer Manantial Termal visitado fue el denominado San Antonio, el cual se encuentra ubicado en las coordenadas 5° 30' 15.0" N Latitud N; 75° 50' 01" W Longitud W y 998 msnm.



Figura 135. Manantial Termal San Antonio. Volcán El Escondido. 2015

En la Tabla 12 se presentan los resultados fisicoquímicos realizados in situ y en laboratorio para el Manantial termal San Antonio, de acuerdo a los resultados el agua se clasifica como Neutra Clorurada.

Tabla 12. Fisicoquímica del agua del Manantial Termal San Antonio. Volcán El Escondido.

Referencia	T°C	pH	Cond. mS/cm	Cl- mg/L	SO ₄ mg/L	F- mg/L	Br- mg/L	PO ₄ mg/L	NO ₃ mg/L
Manantial San Antonio	42.4	6.61	9.068	2275.26	325.01	1.98	4.13	ND	NR

ND: No detectado NR: No realizado

De acuerdo a los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos in situ y de los análisis de aniones para cada una de las muestras recolectadas, las aguas se pueden clasificar como cloruradas neutras. No obstante los Manantiales del Espíritu Santo y San Antonio tienen un contenido apreciable de sulfatos, se recomienda realizar muestreos en otros puntos para verificar los datos y establecer si existe una posible contaminación debido a que estos manantiales termales se encuentran en balnearios turísticos.

12. ACTIVIDAD TECTÓNICA

12.1 RED DE VIGILANCIA.

El porcentaje de operación para la red de vigilancia telemétrica de las estaciones regionales SAN JULIÁN, AGUADA y MARSELLA durante el año 2015 fue del **44.0%**.

Durante este año se destaca la digitalización de la estación analógica de corto periodo SAN JULIAN, en el procedimiento de la actualización de la instrumentación digital se instala un sismómetro triaxial de banda ancha y la instalación del sistema del enlace telemétrico de radio digital (Figura 136).



Figura 136. Digitalización estación sísmica de SAN JULIAN.

11.2. SISMOLOGÍA

En cuanto a la actividad sísmica tectónica, asociada con fracturas y fallas en la región del Eje Cafetero, durante el año 2015 se registraron eventos sísmicos de carácter local, localizados en las siguientes fuentes sismogénicas: Cordillera Occidental, Romeral, Armenia, Ibagué, Honda-Pulí y Marsella-Pereira (Figura 137).

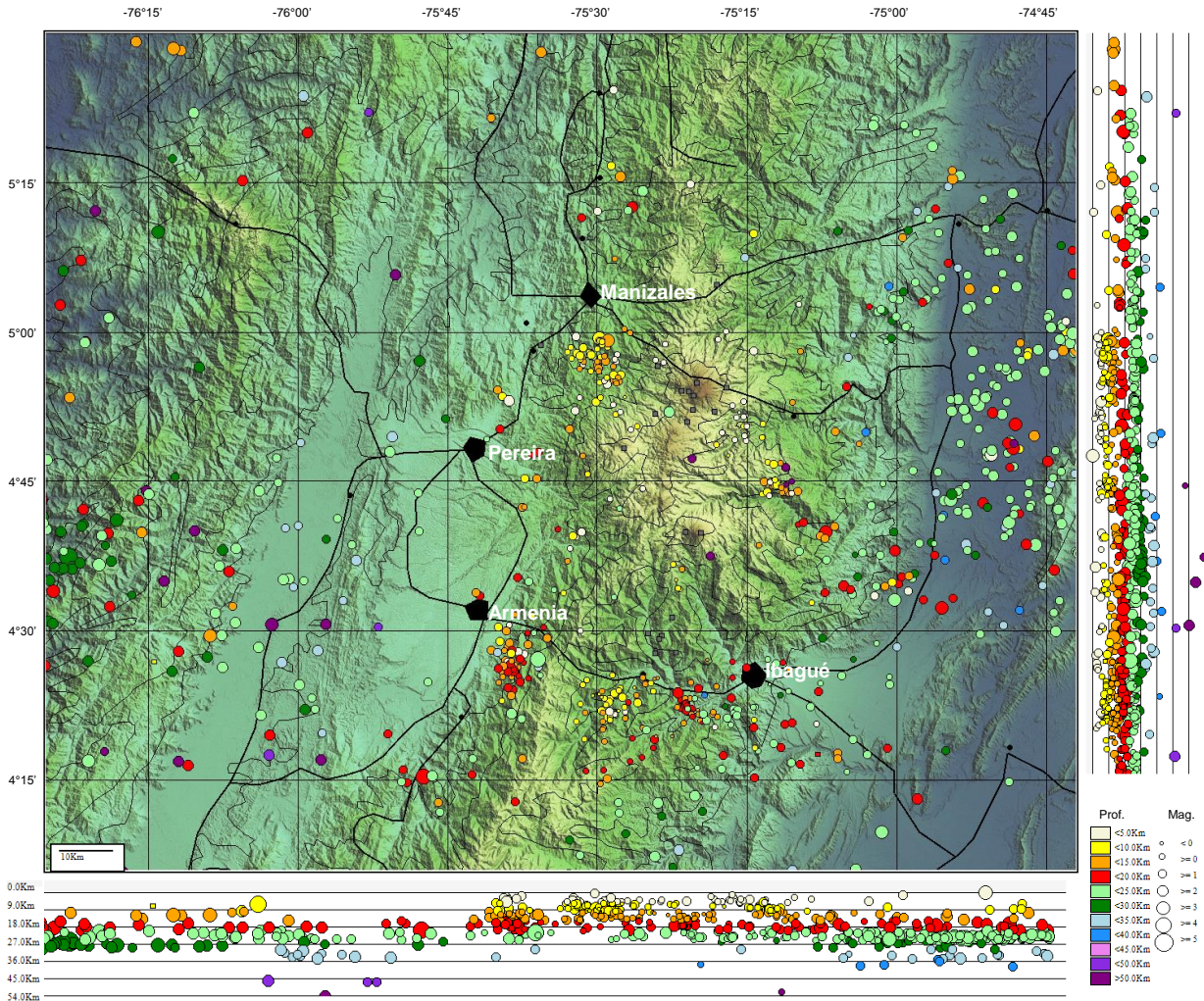


Figura 137. Mapa de localización hipocentral de sismos tectónicos locales en la región central de Colombia, año 2015.

El **Servicio Geológico Colombiano** a través de la **Red Sismológica Nacional de Colombia** reportó la ocurrencia de sismos en el territorio colombiano, en el año 2015 con magnitudes que oscilaron entre 0.1 y 6.3 M_L (Magnitud Local), (Figura 137). Los sismos destacados, por tener magnitudes $\geq 3.0 M_L$, fueron localizados en Murindó, Vigía del Fuerte y Dabeiba (Antioquia), San Pablo y Clemencia (Bolívar), Cubara, Samacá, Paipa, Firavitoba, Páez, Pajarito y Puerto Boyacá (Boyacá), Caldono (Cauca), Agustín Codazzi, San Diego, Río de Oro, San Alberto, González y Valledupar (Cesar), Juradó, Acandí, Litoral del San Juan, Unguía, Bahía Solano, Bajo Baudó y Nuquí (Chocó), Planeta Rico (Córdoba), Cucunubá, Lenguazaque, Guayabetal y Guaduas (Cundinamarca), Gigante y Rivera (Huila), Maicao, Manaure, Uribí, Albania y El Molino (La Guajira), Santa Marta y Nueva Granada (Magdalena), Puerto Gaitán y Uribe (Meta), Mosquera, Cumbal, Tumaco (Nariño), Puerto Santander y Villa del Rosario (Norte de Santander), San Miguel (Putumayo), Córdoba y Génova (Quindío), El Carmen, Los Santos, Palmas del Socorro y

Zapatoca (Santander), Caicedonia, Argelia y Calima (Valle del Cauca), Océano Pacífico y Mar Caribe. Entre estos eventos sísmicos, se destaca el registrado el 10 de Marzo de 2015 a las 20:55 (hora local), con epicentro en Los Santos (Santander) a 157.7 km de profundidad, sentido en todo el país.

En lo referente a la amenaza por actividad volcánica, es importante mencionar que en Colombia existen varios volcanes activos, lo que implica que tanto las autoridades, como la comunidad en general, deben estar permanentemente preparadas y tener activos los planes de contingencia, ante cualquier incremento de dicha actividad.

CONCLUSIONES

- El volcán Nevado del Ruiz (VNR) durante el año 2015 mostró mayor inestabilidad en su comportamiento con respecto al año 2014 marcando un nuevo sub-ciclo en su más reciente ciclo de inestabilidad iniciado a finales del año 2010. Dicho sub-ciclo (que aún continúa) inició el 18 de Noviembre de 2014 y estuvo caracterizado a lo largo del 2015, por el registro frecuente de señales sísmicas relacionadas principalmente con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos y en menor proporción con respecto a los años anteriores del ciclo de sismicidad asociada con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica en el VNR, sin ser por ello, esta última menos importante. Actividad sísmica que en conjunto manifestó la salida de un volumen pequeño de material magmático o domo de lava a la superficie del cráter Arenas.
- La actividad sísmica relacionada con la dinámica de fluidos y gases al interior de los conductos volcánicos, este tipo de señales presentaron niveles energéticos variables y en repetidas ocasiones estuvieron asociadas a emisiones importantes de ceniza a la atmósfera tanto de carácter menor como mayor. Se destaca durante los primeros meses de año episodios de tremor continuo de carácter bandeado, en Julio, Agosto y ocasionalmente en Abril, episodios de tremor volcánico espasmódico y a partir de Septiembre, pulsos de tremor volcánico de corta duración y niveles energéticos importantes y de sismos múltiples de fluido. A través de todo el año los sismos largo periodo (LP) se registraron indistintamente, aunque regularmente fueron observados como predecesores de los eventos antes mencionados y pocas veces al final de éstos. Los sismos de muy largo periodo (VLP) se registraron a partir de Junio y en un mayor porcentaje en Septiembre y principios de Octubre.
- La actividad de tipo volcano-téctónica asociada con el fracturamiento de roca dentro de la estructura volcánica en el VNR, mostró durante el año 2015 importantes niveles de sismicidad en número de sismos registrados y en energía sísmica liberada. Se destacan los incrementos sísmicos de los días Octubre 11 y Noviembre 04 al 05, por su nivel energético y por el número de sismos registrados, respectivamente. Otra actividad destacable relacionada con este tipo de señales, fueron los episodios de sismicidad tipo *drumbeat* o “golpes de tambor”, registrados por primera vez en lo que se conoce instrumentalmente de la actividad sísmica del VNR. Estos episodios fueron discretos, de muy corta duración (hasta aprox. 30 min) y de niveles energéticos bajos (con algunas señales localizables) a muy bajos (sin señales localizables), los cuales acompañaron la salida del domo de lava a la superficie. El episodio de sismicidad tipo *drumbeat* más destacado en el año 2015, ocurrió el día de 20 de Agosto de 2015 por su nivel energético mayor que los demás eventos de este tipo.
- La columna de gases relacionada con actividad fumarólica en el cráter Arenas registró una altura máxima de 3000 m medidos desde la cima del cráter durante el 2015 (el día 26 de Julio). La mayor parte del tiempo la columna de gases mostró una

dirección de dispersión preferencial hacia el Noroccidente y Suroccidente y eventualmente hacia el Nororiente, Sur y Suroriente. En general, se caracterizó por presentar un color blanco asociado a vapor de agua, al igual que matices azules causados por las altas concentraciones de Dióxido de Azufre (SO_2) y en numerosas ocasiones, tonalidades grises debido a la presencia de material particulado (ceniza volcánica).

- Las diversas emisiones de ceniza a la atmósfera asociadas a la actividad de fluido en el VNR, fueron confirmadas a través de fotografías tomadas por las cámaras web instaladas en el área del volcán, reportes de funcionarios del SGC en labores de campo, funcionarios del Parque Nacional Natural los Nevado y habitantes de las poblaciones, así como de imágenes de sensores remotos. Este material, permitió no tener una observación y apreciación de la columna gases y ceniza, sino también evidenciar las zonas de afectación debido a la caída de ceniza y verificar en superficie los cambios en el comportamiento de la actividad volcánica del Nevado del Ruiz.
- Durante el año 2015 fue posible realizar el seguimiento continuo del calor irradiado o emitido en el área de la anomalía térmica del VNR. De acuerdo con los datos suministrados a través del portal de MIROVA de las universidades italianas de Turín y Florencia, (en Italia), se presentaron varias anomalías térmicas importantes con valores bajos a moderados. Se destaca el valor reportado el día 31 de Diciembre a las 01:45 (hora local), con un valor de 32 MW por ser este valor el más alto reportado en el año.
- La actividad sísmica del Volcán Cerro Machín durante el año 2015, estuvo asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico. Esta sismicidad presentó niveles bajos en número y energía con respecto al año 2014. Los eventos sísmicos se localizaron principalmente en el domo principal y al Suroccidente del mismo, a profundidades que variaron entre 1.8 y 4.8 km, al Suroriente (fuente distal entre 7 y 9 km de distancia al domo), a profundidades entre 8.0 y 16 km y, en menor proporción hacia el sector Suroriental y Nororiental, a profundidades entre 1.5 y 9.0 km. La máxima magnitud registrada durante el año fue de 3.0 M_L (magnitud local), asociada a dos sismos ocurridos el 22 de Diciembre a las 06:09 y 06:22 (hora local), respectivamente, durante un incremento sísmico. Los demás parámetros geofísicos monitoreados no registraron cambios importantes durante el año 2014.
- El Volcán Cerro Bravo durante el 2015 se registró principalmente actividad sísmica asociada con el movimiento de fluidos al interior de las cavidades y conductos volcánicos, y esporádicamente, actividad asociada al fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico y a pequeñas avalanchas y desprendimiento de bloques. La señal sísmica de mayor energía relacionada con la dinámica de fluidos ocurrió el día 01 de Agosto de 2015 a las 10:58 (Hora local).
- Durante el 2015 el Volcán Paramillo de Santa Rosa mostró una disminución en su actividad sísmica con respecto al año 2014. La actividad sísmica estuvo asociada a

fracturamiento de roca de baja energía y de acuerdo con el bajo porcentaje de sismos localizables (aprox. 35%), ésta se registró principalmente en el sector Norte a Noroccidental del edificio volcánico. Las profundidades de estos eventos oscilaron entre 2.5 y 13.6 km, presentando una concentración mayor entre 4.0 y 8.0 km.

- El Volcán Nevado de Santa Isabel (VNSI) durante el año 2015 continuó presentando actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, mostrando una disminución en la actividad con respecto al año anterior. Los sismos se localizaron principalmente al Suroccidente, al Occidente, en el flanco Norte y en menor medida al Noroccidente y al Oriente cercano y distal de la estructura volcánica, a profundidades entre 1.5 y 7.2 km. La máxima magnitud registrada fue de 1.7 M_L (Magnitud Local), correspondiente al sismo del día 17 de Enero a las 12:11 (hora local). En el sector conocido como Cerro España al Sur del VNSI, también se observó una disminución importante (en número y energía) en la actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca.
- La actividad sísmica en el Volcán Paramillo del Cisne (VPC) mostró un aumento en la actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico con respecto al año anterior y, por primera vez fueron registrados sismos de tipo híbrido (de magnitudes importantes) en el edificio volcánico. Los sismos asociados a fracturamiento de roca se localizaron a través del edificio volcánico y sectores próximos a éste, a profundidades entre 1.7 y 7.7 km. La máxima magnitud local registrada en el año fue de 2.9 M_L , correspondiente con el evento registrado a la 01:00 (hora local) en el sector Sureste a una profundidad de 3.2 km. Los sismos tipo híbrido se registraron en Octubre a profundidades entre 1.7 y 2.8 km y con magnitudes importantes (Magnitud Local máxima 2.7 M_L).
- En el volcán Paramillo del Quindío, durante el 2015, la actividad sísmica aumentó respecto al 2014, tanto en número como energía liberada. Los sismos se localizaron principalmente al Occidente y al Noroccidente distal del edificio volcánico, a profundidades entre 1.1 y 8.7 km. La mayor magnitud registrada fue de 1.7 M_L (Magnitud local) el 20 de Julio a las 09:46, localizado al Noroccidente de la estructura volcánica a una profundidad de 2.6 km.
- La actividad sísmica de los volcanes Nevado del Tolima, Romeral y San Diego, mantuvo, durante el 2015, niveles estables. Adicionalmente, no se reportaron cambios en los demás parámetros monitoreados.
- La sismicidad de origen tectónico de carácter local se concentró en las fuentes sismogénicas: Cordillera Occidental, Armenia, Ibagué, Romeral, Anzoategui-Alvarado y Honda-Pulí. En donde los diez (10) sismos con mayor energía sísmica registrada oscilaron entre 5.1 y 6.6 en la escala de Richter.
- Algunas de las estaciones de la red de deformación del VNR continúan evidenciando cambios deformativos, claramente relacionados con el actual estado de actividad del volcán, y con los cambios mostrados, tanto en la actividad sísmica

como geoquímica. La estación de inclinometría electrónica REFU, ha mostrado un cambio acumulado de 900 μ rad desde el 2012 hasta Diciembre de 2015, comportamiento claramente relacionado con el actual ciclo de actividad del VNR.

- Los inclinómetros electrónicos de la red de deformación del VCM mantienen en general estabilidad, a excepción del inclinómetro electrónico CIMA ubicado en el domo principal, el cual viene presentando algunos cambios acumulados de 466 μ rad y 312 μ rad para la componente Norte y Este respectivamente hasta Diciembre de 2015, lo cual obedece probablemente a procesos de origen local.
- Las estaciones GPS instaladas en los volcanes NR y CM operaron de manera óptima y los datos recolectados presentan buena calidad, mostrando buena correlación con los procesos deformativos mostrados en el volcán Nevado del Ruiz, durante los últimos años, al igual que con la estabilidad del Volcán Cerro Machín.
- Algunos de los inclinómetros electrónicos instalados en los volcanes Nevado de Santa Isabel y Tolima registraron algunos cambios, lo cual indica la posibilidad de que estén ocurriendo procesos deformativos en estas estructuras.
- El inclinómetro electrónico instalado en el Volcán Cerro bravo mantiene estabilidad, comportamiento acorde con el estado de actividad de este volcán.
- Las descargas de SO₂ en el VNR durante el año 2015 continuaron presentando variaciones, los flujos registrados fueron menores con respecto a los años anteriores, no obstante, las tasas de desgasificación siguen permaneciendo altas, sus valores se encuentran por encima de las 10000 t/d, estos flujos son considerados altos teniendo en cuenta que el Volcán no tuvo episodios eruptivos durante el 2015, pero si incrementos de actividad evidenciados en la sismicidad y deformación.
- Las estaciones Telemétricas de Gas Radón ubicadas en el Volcán Nevado del Ruiz registraron algunas variaciones, no obstante no se observa un comportamiento relacionado entre todas las estaciones que se tienen en funcionamiento que indique que haya correlaciones directas con la actividad tipo volcano-tectónica.
- Los parámetros fisicoquímicos de las fuentes termales en el VNR presentaron estabilidad, lo cual muestra que no se ven afectados por el estado actual de actividad del Ruiz, cuando se han manifestado cambios en los parámetros fisicoquímicos especialmente en el potencial de Hidrógeno los cambios en el comportamiento del volcán se evidencian en el largo plazo, lo cual hace que no haya una relación directa con los episodios de actividad y la actividad tipo hidrotermal que permita que se generen cambios en temperatura y pH.
- Los análisis realizados en las muestras de gases de la fumarola Nereidas en el VNR, evidenciaron mayor aporte de compuestos azufrados, lo cual se reflejó en el

incremento de SO₂ de las muestras tomadas en el mes de Agosto, lo anterior se refleja por la constante actividad presentada en el Volcán. Los mayores valores de desgasificación empezaron a registrarse entre Agosto y Septiembre, por ello las muestras del mes de Agosto presentaron el incremento en SO₂.

- La concentración de gas radón en el Volcán Cerro Machín se mantuvo constante, no se registraron variaciones importantes. Los manantiales termales en el VCM aunque presentaron algunas variaciones, éstas no tuvieron relación con la actividad volcánica, la influencia de factores externos como: precipitaciones, mezclas e infiltraciones hizo que se presentaran algunos cambios fisicoquímicos, especialmente en la conductividad eléctrica.
- Los manantiales termales de los balnearios aledaños al Volcán Paramillo de Santa Rosa no presentaron variaciones importantes durante las medidas del año 2015.
- En el 2015 se realizó reconocimiento de los manantiales termales aledaños al Volcán El Escondido, los resultados de los análisis muestran que son aguas tipo neutras cloruradas.