



Instituto de
Altos Estudios Espaciales
"Mario Gulich"



Diseño de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a Incendios de Vegetación – SARTiv-

Por Lic. Nicolás A. Mari

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física
y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich
como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGÍSTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y
RESPUESTA TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Diciembre, 2012

©IG - CONAE/UNC 2012

© FaMAF - UNC 2012

Dr. Marcelo Scavuzzo y Dr. Fabiano Morelli

Palabras Clave: Fuego, Vegetación, SIG, Teledetección.

Resumen

El trabajo de tesis presenta el diseño de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a incendios de vegetación denominado SARTiv. El objetivo de SARTiv es generar información basada en la observación y el seguimiento de las condiciones que determinan el ciclo de ocurrencia de incendios (*Pre, Durante y Post*). *Pre fuego* corresponde al análisis de las condiciones de riesgo de incendio. La detección de eventos de incendio corresponde a la etapa *durante*, y pretende caracterizar la distribución espacio temporal de la ocurrencia de eventos de incendios. La etapa *post fuego* corresponde a las actividades de cuantificación de superficies quemadas y el análisis de su recuperación. En este contexto, esta tesis se orienta al análisis de los requerimientos de los usuarios, a partir del cual se formulan productos y una arquitectura preliminar del sistema.

Abstract

The thesis presents the design of an Early Warning and Response System to vegetation fires, called SARTiv. The goal of is to generate useful information based on the observation and monitoring of the conditions that determine the cycle of fire occurrence (*Pre fire event, during and Post fire event*). *Pre event* stage corresponds to the analysis of fire risk conditions. The fire detection events stage is intended to characterize the distribution and the time of fire occurrence. The *post fire event* stage corresponds to burned area quantification and the analysis of vegetation recovery. In this context, this thesis aims to analyze the requirements of fire users, from which products are formulated and preliminary system architecture thereof.

Agradecimientos

Mi agradecimiento va dirigido a todos mis compañeros que estuvieron a mi lado a lo largo de la maestría. A todos por igual, a Juanjo Fernández, a Mirko Panozzo a Romina Solorza, a Paola Cardozo y a Rayner de Ruyt, gracias por compartir todo este ciclo de estudio. Gracias a los profesores de la maestría AEARTE, especialmente a aquellos que supieron acompañar en los momentos buenos y no tan buenos. Gracias a Ximena Porcassi por su tutoría, gracias a Camilo Rotela por sus enseñanzas y por siempre transmitir sentido del humor y alegría. Gracias a Sergio Masuelli por su compañerismo, a Mario Lanfri por su predisposición para asesorarme con la tesis y hacer que avance, a Sofía Lanfri por guiarme y por estar a mi lado cuando precise su ayuda, a Nani De Elia, a Sebastián Heredia, a Martín Labanda a March Jacob, a Carolina Tauro, a Eduardo Romero. Gracias especiales a Laura Sarrate, por haber siempre confiado y motivado este proyecto, muchas gracias a Carlos Albornoz por haber predispuesto los medios de trabajo, gracias a Marta por siempre impartir un sentido familiar al instituto, gracias a todos los profesores externos al Gulich, a Elvio Pilotta, a los profes Jaime Polop y Cecilia Provenzal, especialmente quiero agradecer a Alejandro Frery por su inmenso aporte para esta tesis, gracias a toda la gente de Ascentio, especialmente a Marcelo Oglietti por sus ideas y entusiasmo hacia este proyecto, también a Esteban Carranza por haber confiado y prestado ideas. Gracias a todo el grupo de alumnos AEARTE 2011, especialmente al grupo que conformamos para los temas de fuego, gracias especiales a Ariel Torazza por haber sido el primero en confiar en este proyecto, gracias Laura Salazar por todos tus aportes al grupo, gracias Gonzalo Quiroga por tus iniciativas, gracias Andrés Lighuezzolo por tus aportes. Gracias a Esteban Zupán por tu iniciativa y empuje para la realización del proyecto. A todos muchas gracias por su compañerismo. Quiero agradecer con énfasis a Gabriel Platzeck por haber permitido que toda esta experiencia suceda en el IG y siempre haber sido sincero. A Pablo Mercuri por ser quien empujó este proyecto desde su inicio, muchas gracias Pablo por todo tu apoyo y la confianza de tu parte. Y por sobre todos, quiero agradecer a Marcelo Scavuzzo quien desde el primer instante supo conducir mi estadía en el IG, con alta predisposición de trabajo y gran compañerismo. Marcelo es el mentor de este proyecto y guía, constante asesor y camarada. Quiero agradecer a toda mi familia y amigos, por ser mis guías espirituales, mis constantes inspiraciones. A mi madre, y a mi padre que descansen en paz. A Alejandra Guzmán a mi hermano Cedric, a Fernando Carcedo a mi hermano Manuel. A Silvia Cerino por ser mi compañera constante, por todo su cariño. A mis amigos de la Vecindad, grandes compañeros. Este trabajo se lo dedico a mi viejo, Renaud Mari, quien ha sido mi guía, mi amigo. Gracias eternas a todos los que me ayudaron todo este tiempo. Gracias Mecha, Ramiro Marengo, Ulises Badi, Matilde Moretti, Ezequiel Moretti, Francisco y Federico Mántaras, Lucas Allende, Raúl Quiroga, Duncan Grant, a todos gracias, a mis primos Mari, a mis primos Carcedo. Y para concluir, gracias especiales al INTA, mí base.

Resumen

Los incendios de vegetación representan una importante amenaza a los sistemas naturales y productivos de Argentina, en particular es destacable la amenaza sobre las Áreas Naturales Protegidas y el sector forestal. Según datos del Plan Nacional de Estadística Forestal (2001-2009), en Argentina se queman en promedio 1.5 millones de hectáreas por año, afectando poblaciones y diversos tipos de sistemas productivos. La información provista por sensores remotos, ofrece la posibilidad de generar herramientas de gran utilidad en el ámbito de la prevención, el control, y la evaluación de daños por incendios. El Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a incendios de vegetación (SARTiv) surge como una iniciativa del Instituto Gulich de la CONAE/UNC, para responder a los requerimientos del sector forestal y del sistema de Parques Nacionales. El proyecto se plantea para ser desarrollado en un contexto interinstitucional con el INTA, la APN y el MAGyP, entre otros.

El objetivo de SARTiv es generar información basada en la observación y el seguimiento de las condiciones que determinan el ciclo de ocurrencia de incendios (*Pre, Durante y Post*). *Pre fuego* corresponde al análisis de las condiciones de riesgo de incendio, formulado a partir de la características de amenaza y la vulnerabilidad del territorio. La detección de eventos de incendio corresponde a la etapa *durante*, y pretende caracterizar la distribución espacio temporal de la ocurrencia de incendios. La etapa *post fuego* corresponde a las actividades de cuantificación de superficies quemadas y el análisis de su recuperación. En este contexto, el principal objetivo de esta tesis se orienta al diseño de SARTiv. Se desarrolla el análisis de los requerimientos de los usuarios, a partir del cual se formulan productos y una arquitectura preliminar del sistema. De todos los productos propuestos, se aborda la implementación de los vinculados a: 1) la identificación de eventos de incendios a partir de focos de calor, 2) el uso de simulaciones para la estimación de riesgo y 3) la delimitación de áreas quemadas a partir del uso de imágenes SAR.

Abstract

Vegetation fires are a major threat to natural and productive systems of Argentina, particularly on the National system of Protected Areas, and the forestry sector. According to the National Statistics Forest Plan (2001-2009), in Argentina are burned an average of 1.5 million hectares per year, affecting populations and different types of productive systems. The information provided by remote sensing offers the possibility of generating useful tools in the field of prevention, control, and evaluation of fire damage. The SARTiv project, which means "Early Warning and Response System to vegetation fires," is an initiative of the Gulich Institute from CONAE / UNC, thought to meet the requirements of the forestry sector and the Argentinean

National Parks system. The project is proposed to be developed in an institutional context with INTA, the APN and the MAGyP.

The goal of SARTiv is to generate useful information based on the observation and monitoring of the conditions that determine the cycle of fire occurrence (*Pre fire event, during and Post fire event*). *Pre event* stage corresponds to the analysis of fire risk conditions, formulated on the basis of hazard and vulnerability interactions. The fire detection events stage is intended to characterize the distribution and the time of fire occurrence. The *post fire event* stage corresponds to burned area quantification and the analysis of vegetation recovery.

In this context, this thesis engages with the objective of the system design. It develops an analysis of the users requirements, from which products are formulated and preliminary architecture thereof. Of all the products here proposed, addresses the implementation of those linked to 1) the identification of fire events from active fires, 2) the use of simulations for estimating risk and 3) the detection of burned areas from the use of SAR images.

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	4
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	11
ABREVIATURAS	12
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	15
1.1. OBJETIVOS DE LA TESIS	16
1.2. CONTEXTO INSTITUCIONAL.....	17
1.3. EL SISTEMA SARTIV	18
1.3.1. Fase UR: Definición de los requerimientos de usuario.....	19
1.3.2. Fase SR: Definición de los requerimientos de software	20
1.3.3. Fase AD: Definición del diseño arquitectónico	20
1.3.4. Fase DD: Diseño detallado y producción de código.....	21
1.3.5. Fase TR: Transferencia del software a operaciones	22
1.3.6. Fase OM: Operaciones y mantenimiento	22
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	23
2. REQUERIMIENTOS	25
<i>Pre-fuego</i>	27
<i>Durante</i>	28
<i>Post-fuego</i>	28
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS	30
2.1.1. <i>Requerimientos de orden 0</i>	31
2.2. MÓDULO DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INCENDIO –MOPRI-	32
2.2.1. <i>Tabla de requerimientos de orden superior MoPRI</i>	35
2.3. MÓDULO DE DETECCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE INCENDIOS ACTIVOS: MoDIIA	41
2.3.1. <i>Tabla de requerimientos de orden superior MoDIIA</i>	44
2.4. MÓDULO DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS: MoDAQ.....	48
2.4.1. <i>Tabla de requerimientos de orden superior MoDAQ</i>	50
2.5. MÓDULO DE SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS: MoSIMI.....	53
2.5.1. <i>Tabla de requerimientos de orden superior MoSIMI</i>	56
2.6. IDENTIFICACIÓN DE PRODUCTOS.....	60
2.6.1. <i>MoPRI_p1: Índice de Amenaza:</i>	61
2.6.2. <i>MoPRI_p2: Índice de Peligrosidad Topográfica</i>	62
2.6.3. <i>MoPRI_p3: Índice de Peligrosidad de la Vegetación</i>	62
2.6.4. <i>MoPRI_p4: Índice de Peligrosidad Meteorológico</i>	62

2.6.5.	<i>MoPRI_p5: Índice de valoración</i>	63
2.6.6.	<i>MoPRI_p6: Índice de Accesibilidad</i>	63
2.6.7.	<i>MoPRI_p7: Índice Integrado de Riesgo</i>	63
2.6.8.	<i>MoDAQ_p1: Área Quemada</i>	64
2.6.9.	<i>MoDIIA_p1: Eventos de Incendio</i>	64
2.6.10.	<i>MoDIIA_p2: Alertas y resúmenes de eventos de incendio a nivel Nacional.</i>	64
2.6.11.	<i>MoSiMI_p1: Simulaciones del comportamiento de incendios</i>	65
3.	ARQUITECTURA Y DESCRIPCIÓN DE PRODUCTOS	66
3.1.	DEFINICIÓN DEL DISEÑO ARQUITECTÓNICO, SISTEMAS, SUB-SISTEMAS Y MÓDULOS.	66
3.2.	MoPRI	70
3.2.1.	<i>Índice de Amenaza (MoPri_p1)</i> :.....	70
3.2.2.	<i>Índice de Amenaza en alta resolución (MoPRI_P1_HR_1_n)</i>	70
3.2.3.	<i>Índice de Peligrosidad Topográfica (MoPRI_p2)</i>	71
3.2.4.	<i>Índice de Peligrosidad Topográfica en alta resolución (MoPRI_p2_HR_n)</i>	72
3.2.5.	<i>Índice de Peligrosidad de la Vegetación (MoPRI_p3)</i>	72
3.2.6.	<i>Índice de Peligrosidad de la Vegetación en alta resolución (MoPRI_p3_HR_1)</i>	73
3.2.7.	<i>Índice de Peligrosidad Meteorológico (MoPRI_p4)</i>	73
3.2.8.	<i>Índice de valoración del paisaje (MoPRI_p5)</i>	73
3.2.9.	<i>Índice de Accesibilidad (MoPRI_p6)</i>	74
3.2.10.	<i>Índice Integrado de Peligrosidad y Riesgo (MoPRI_p7)</i>	75
3.2.11.	<i>Índice Integrado de Peligrosidad y Riesgo en alta resolución (MoPRI_p7_HR_1)</i>	76
3.2.12.	<i>Índice de Peligro de Propagación (MoPRI_p8)</i>	77
3.3.	MoDAQ.....	78
3.3.1.	<i>Cartografía de Áreas Quemadas (MoDAQ_p1)</i>	78
3.3.2.	<i>Área Quemada en alta resolución (MoDAQ_p2)</i>	79
3.3.3.	<i>Reportes de Áreas Quemadas a nivel Nacional (MoDAQ_p3)</i>	79
3.4.	MoDIIA.....	79
3.4.1.	<i>Focos de Calor (MoDIIA_p1)</i>	79
3.4.2.	<i>Eventos de Incendios (MoDIIA_p2)</i>	80
3.4.3.	<i>Alertas y resúmenes de eventos de incendios a nivel Nacional (MoDIIA_p3)</i>	81
3.5.	MoSiMI	82
3.5.1.	<i>Simulador interactivo del comportamiento de incendios (MoSiMI_p1)</i>	82
4.	DESARROLLO Y DISEÑO DE PRODUCTOS	83
4.1.	RESUMEN.....	83
4.2.	INTRODUCCIÓN.....	84
4.3.	INTRODUCCIÓN AL MANEJO DE DATOS ESPACIALES EN R APLICADO A INCENDIOS FORESTALES	86
4.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	97
4.4.1.	<i>Área de estudio</i>	97
4.4.2.	<i>Datos Utilizados</i>	98
4.4.3.	<i>Esquema Metodológico</i>	99
4.4.4.	<i>Filtrado de focos de calor</i>	100
4.4.5.	<i>Caracterización de formas y superficies quemadas</i>	105
4.5.	RESULTADOS.....	115

4.5.1.	<i>Simulaciones</i>	116
4.5.2.	<i>Casos reales</i>	121
4.5.3.	<i>Validación</i>	124
4.5.4.	<i>Cartografías</i>	133
4.6.	<i>Conclusiones y Discusión</i>	136
5.	DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN ORIENTADA A LA PREDICCIÓN DEL PELIGRO DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS	138
	<i>MÓDULO de Peligrosidad y Riesgo de incendio (MoPRI)</i>	138
5.1.	RESUMEN.....	138
5.2.	INTRODUCCIÓN.....	139
5.3.	AUTÓMATAS CELULARES.....	140
5.3.1.	<i>Definiciones generales</i>	141
5.3.2.	<i>Nuestro modelo</i>	141
5.4.	RESULTADOS.....	144
5.4.1.	<i>Condiciones iniciales</i>	144
5.4.2.	<i>Estimaciones de riesgo</i>	146
5.4.3.	<i>Casos especiales</i>	147
5.5.	CONCLUSIONES.....	151
6.	DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN DE DETECCIÓN DE ÁREAS QUEMADAS Y EVALUACIÓN DE DAÑOS A PARTIR DE DATOS DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR) Y DATOS ÓPTICOS¹	152
	<i>MÓDULO de detección de Áreas Quemadas (MoDAQ)</i>	152
6.1.	RESUMEN.....	152
6.2.	INTRODUCCIÓN.....	152
6.3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	153
6.3.1.	<i>Área de estudio</i>	153
6.3.2.	<i>Datos SAR</i>	154
6.3.3.	<i>SAR – Análisis estadístico</i>	155
6.3.4.	<i>SAR – Estimación de área quemada</i>	155
6.3.5.	<i>Datos ópticos</i>	155
6.3.6.	<i>Datos complementarios</i>	156
6.4.	RESULTADOS.....	156
	CONCLUSIONES	161
	BIBLIOGRAFÍA	166
	APÉNDICE	177

Índice de Figuras

FIGURA 1: RED DE VINCULACIÓN INTERINSTITUCIONAL.	18
FIGURA 2: ESQUEMA DEL AMBIENTE OPERACIONAL DEL SISTEMA SARTIV	26
FIGURA 3: ESQUEMA PRINCIPAL DE LA ORGANIZACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE USUARIOS Y PRODUCTOS DEFINIDOS.	29
FIGURA 4: ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA DE LOS REQUERIMIENTOS DE USUARIOS CORRESPONDIENTE AL MÓDULO MoPRI.....	35
FIGURA 5: ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA SOBRE LOS REQUERIMIENTOS DE USUARIOS CORRESPONDIENTE AL MÓDULO MoDIIA.	43
FIGURA 6: ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA SOBRE LOS REQUERIMIENTOS DE USUARIOS CORRESPONDIENTE AL MÓDULO MoDAQ.....	49
FIGURA 7: ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA SOBRE LOS REQUERIMIENTOS DE USUARIOS CORRESPONDIENTE AL MÓDULO MoSIMI.....	55
FIGURA 8: OPERACIÓN DEL SISTEMA SARTIV DENTRO DEL SISTEMA DE CONAE.....	66
FIGURA 9: ARQUITECTURA DEL SISTEMA SARTIV.....	68
FIGURA 10: CLASES ESPACIALES DE PUNTOS, Y SUS COMPONENTES (SLOTS).....	88
FIGURA 11: CLASES ESPACIALES DE LÍNEAS Y POLIGONOS, JUNTO A SUS RESPECTIVOS COMPONENTES (SLOTS).....	89
FIGURA 12: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE IMPORTACIÓN DE DATOS HACIA SPATSTAT.....	91
FIGURA 13: CARTOGRAFÍA DE FOCOS DE CALOR EN TUCUMÁN (IZQ.), Y ESTIMACIÓN DE DENSIDAD DE FOCOS (FOCOS/HA) PARA EL AÑO 2008 (DER).....	94
FIGURA 14: DENSIDAD DE FOCOS DE CALOR A NIVEL NACIONAL (TAMAÑO DE PIXEL=1HA) (AÑO 2008).....	95
FIGURA 15: CUANTIFICACIÓN DEL NÚMERO DE FOCOS DETECTADOS PARA CADA PROVINCIA (ARRIBA), Y EL CALCULO DE LA DENSIDAD PROMEDIO DE FOCOS (AÑO 2008).....	96
FIGURA 16: ÁREA DE ESTUDIO DEL PRODUCTO MoDIIA_p2	97
FIGURA 17: ESQUEMA METODOLÓGICO DEL PROCESO DE DETECCIÓN DE EVENTOS DE INCENDIO.	100
FIGURA 18: SE REPRESENTAN SIMULACIONES EN BASE A LA REALIZACIÓN DEL PROCESO DE PUNTOS POISSON AGLOMERADO (PPA), CLASIFICADAS DE ACUERDO A UN VALOR K CRECIENTE. EN CRUCES ROJAS (+) SE IDENTIFICAN LOS PUNTOS CON UN NIVEL MAYOR DE AGLOMERACIÓN Y EN ASTERISCOS NEGROS (*), LOS PUNTOS QUE SE CLASIFICAN COMO RESIDUALES	103
FIGURA 19: SE PRESENTAN DIVERSAS SIMULACIONES DE PROCESOS DE PUNTOS POISSON AGLOMERADOS (PPA) , A LOS CUALES SE LES APLICA LA FUNCIÓN DE TRIANGULACIÓN DE DELUNAY. CADA UNO DE LOS GRÁFICOS INDICA UN PPA CON UNA SU DISTRIBUCIÓN ALEATORIA CORRESPONDIENTE.	108
FIGURA 20: SE PRESENTAN DIVERSAS SIMULACIONES DE PROCESOS DE PUNTOS POISSON AGLOMERADOS (PPA) , A LOS CUALES SE LES APLICA LOS DIAGRAMAS DE VORONOI.	109
FIGURA 21: DIAGRAMAS DE VORONOI Y TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY SOBRE UN PROCESO DE PUNTOS POISSON AGLOMERADOS (PPA) CON DISTINTOS NIVELES DE ASOCIACIÓN ESPACIAL.	111
FIGURA 22: SE PRESENTAN SIMULACIONES PPA, DONDE SE EJEMPLIFICA EL PODER DE CARACTERIZACIÓN DE LA FORMA DEL A-SHAPE, PRESENTÁNDOSE DE IZQUIERDA A DERECHA LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY, LOS DIAGRAMAS DE VORONOI Y SU SUPERPOSICIÓN.	113
FIGURA 23: EJEMPLOS DE LA INFLUENCIA DEL PARÁMETRO A SOBRE LAS FORMAS DEL A-SHAPE. DE IZQUIERDA A DERECHA SE PRESENTAN SIMULACIONES BASADAS EN PROCESOS POISSON AGLOMERADOS (PPA) CON UN TAMAÑO PARA A= 0.05, 0.02 Y 0.04.....	114
FIGURA 24: FOCOS DE CALOR SIMULADOS CORRESPONDIENTE AL INCENDIO DE LA CANDELARIA: ARRIBA DE IZQUIERDA A DERECHA SE PRESENTAN LOS RESULTADOS DE CONTROLAR LA INTENSIDAD λ , AJUSTADA A LA FORMA DEL PERÍMETRO CONOCIDO. ABAJO, EN EL MISMO ORDEN, SE REPRESENTA LA ESTIMACIÓN DE DENSIDAD PARA CADA NIVEL DE INTENSIDAD.....	117
FIGURA 25: INCENDIO DE LA FRONDA, 2002. LOS TRES PANELES DE ARRIBA INDICAN DE IZQUIERDA A DERECHA LA SUPERFICIE CONOCIDA, EN EL CENTRO LA SIMULACIÓN Y LUEGO EL DIAGRAMA DE VORONOI. ABAJO EN EL MISMO ORDEN SE PRESENTA LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY, LA COMBINACIÓN DELUNAY-VORONOI, Y EL RESULTADO DEL ESTIMADOR DE FORMAS A SHAPE.	118

FIGURA 26: INCENDIO DE LA CANDELARIA, 2003. LOS TRES PANELES DE ARRIBA INDICAN DE IZQUIERDA A DERECHA LA SUPERFICIE CONOCIDA, EN EL CENTRO LA SIMULACIÓN Y LUEGO EL DIAGRAMA DE VORONOI. ABAJO EN EL MISMO ORDEN SE PRESENTA LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY, LA COMBINACIÓN DELUNAY-VORONOI, Y EL RESULTADO DEL ESTIMADOR DE FORMAS A SHAPE. ...	119
FIGURA 27: INCENDIO TALA CAÑADA, 2003. LOS TRES PANELES DE ARRIBA INDICAN DE IZQUIERDA A DERECHA LA SUPERFICIE CONOCIDA, EN EL CENTRO LA SIMULACIÓN Y LUEGO EL DIAGRAMA DE VORONOI. ABAJO EN EL MISMO ORDEN SE PRESENTA LA TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY, LA COMBINACIÓN DE DELUNAY-VORONOI, Y EL RESULTADO DEL ESTIMADOR DE FORMAS A SHAPE.	120
FIGURA 28: SUPERPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS PARA CADA INCENDIO SIMULADO, JUNTO A LAS SUPERFICIES CONOCIDAS (ROJO).....	121
FIGURA 29: INCENDIO EN SAN LUIS.....	122
FIGURA 30: INCENDIO EN BRASIL.....	123
FIGURA 31: INCENDIO EN ASCOCHINGA, CÓRDOBA.....	124
FIGURA 32: SITIOS DE VALIDACIÓN DISTRIBUIDOS SOBRE EL ÁREA DE ESTUDIO. LA ESCALA DE TONOS VERDES CORRESPONDE A LA COBERTURA DE ÁRBOLES (VEGETATION CONTINUOUS FIELDS).....	125
FIGURA 33: MATRIZ DE CONFUSIÓN DE LAS CLASES QUEMADAS Y NO QUEMADAS, JUNTO A SU INTERPRETACIÓN.	126
FIGURA 34: ARRIBA A LA IZQUIERDA SE PRESENTA LA COMPOSICIÓN EN FALSO COLOR DE UNA IMAGEN LANDSAT CORRESPONDIENTE AL SITIO DE LA VENTANA 226/074 EN BRASIL (RGB 7 4 3). A SU DERECHA, EL RESULTADO DE CLASIFICAR LAS ÁREAS QUEMADAS REPRESENTADAS EN NEGRO. ABAJO LA MISMA INTERPRETACIÓN PARA EL SITIO CORRESPONDIENTE A LA VENTANA 226/083 EN EL DELTA DEL PARANÁ.....	127
FIGURA 35: ERRORES DE COMISIÓN (EC), ERRORES DE OMISIÓN (EO) Y FIABILIDAD GLOBAL (FG) PARA CADA UNO DE LOS SITIOS VALIDADOS.	130
FIGURA 36: SE PRESENTAN LOS EVENTOS DE INCENDIOS VALIDADOS CORRESPONDIENTES A CADA UNO DE LOS SITIOS DE VALIDACIÓN. EN ROJO SE OBSERVA EL RESULTADO DEL PRODUCTO, Y EN PUNTOS NEGROS LOS FOCOS DE CALOR.	131
FIGURA 37: CUADRANTES DE VALIDACIÓN CORRESPONDIENTES A LOS SITIOS DE SAN LUIS.	132
FIGURA 38: COEFICIENTE KAPPA PARA CADA UNO DE LOS SITIOS VALIDADOS.....	133
FIGURA 39: DISTRIBUCIÓN DE EVENTOS DE INCENDIOS PARA LOS AÑOS 2007 (ROJO), 2008 (AZUL), 2009 (NARANJA), Y 2010 (VERDE).	134
FIGURA 40: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE EVENTOS DE INCENDIOS PARA LOS AÑOS 2007, 2008, 2009 Y 2010 EN ARGENTINA.....	135
FIGURA 41: PSEUDO CÓDIGO DE LA APLICACIÓN IMPLEMENTADA EN IDL.	143
FIGURA 42: CARTOGRAFÍAS SOBRE LAS CONDICIONES INICIALES PLANTEADAS PARA LA SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE INCENDIOS. ARRIBA A LA IZQ. SE PRESENTA LA IMAGEN SPOT EMPLEADA DE BASE. ARRIBA A LA DERECHA SE PRESENTAN LOS PSEUDO COMBUSTIBLES. ABAJO A LA IZQ. SE PRESENTA LA CARTOGRAFÍA DE AMENAZA Y A LA DERECHA LOS PUNTOS DE IGNICIÓN.	145
FIGURA 43: ESTIMACIONES DE RIESGO DE ACUERDO A DISTINTOS METODOS. A LA IZQUIERDA EL ÍNDICE DE RIESGO CONVENCIONAL, Y A SU DERECHA EL ÍNDICE DE PELIGRO DE PROPAGACIÓN.....	147
FIGURA 44: EFECTO DEL VIENTO PARA 3 SIMULACIONES DE INCENDIOS BAJO DIVERSAS CONDICIONES DE AMENAZA Y VULNERABILIDAD. EN COLOR VIOLETA SE REPRESENTA LA MATRIZ DE COMBUSTIBLES, Y EN COLOR VERDE LA SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE INCENDIOS CON EL EFECTO DEL VIENTO INCORPORADO.	148
FIGURA 45: ÍNDICE DE PELIGRO DE PROPAGACIÓN CON EFECTO DEL VIENTO NO.	149
FIGURA 46: ÍNDICE DE PELIGRO DE PROPAGACIÓN CON EFECTO DEL CORTAFUEGO.	150
FIGURA 47: PERFILES LONGITUDINALES REPRESENTATIVOS DE LA FRECUENCIA DE PÍXELES QUEMADOS PARA TRES MODELOS DE ÍNDICES DE PROPAGACIÓN. EN ROJO SE PRESENTA EL CASO TESTIGO, EN AZUL EL CASO CON VIENTO, Y EN VERDE EL CASO CON VIENTO Y CORTAFUEGO.	151
FIGURA 48: LA ISLA DE CERDEÑA Y EL ÁREA DE ESTUDIO CON EL DETALLE DEL PERÍMETRO QUEMADO: IMAGEN ALOS EN RGB: HH, HV, HH.....	154
FIGURA 49: DATOS ALOS/PALSAR: ARRIBA A LA IZQUIERDA; IMAGEN PREVIA AL INCENDIO. ARRIBA A LA DERECHA; IMAGEN POSTERIOR AL INCENDIO. ABAJO A LA IZQUIERDA; DIFERENCIA EN LA POLARIZACIÓN HV. ABAJO A LA DERECHA; ESTIMACIÓN DE ÁREA QUEMADA POR VALORES DE UMBRALES POSITIVOS PROVEÍDOS POR DATOS DE ΔHV SAR.	156

FIGURA 50: DATOS ÓPTICOS DE SPOT-4; ARRIBA A LA IZQUIERDA; NORMALIZED BURNED RATIO (NBR). ARRIBA A LA DERECHA; NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI). ABAJO A LA IZQUIERDA; INFRARROJO CERCANO (IRC). ABAJO A LA DERECHA; ESTIMACIÓN DEL ÁREA QUEMADA A PARTIR DE UMBRALES DE LOS ÍNDICES Y DATOS ESPECTRALES DEL IRC.....	157
FIGURA 51: INTERACCIONES ENTRE DATOS SAR PREVIOS Y POSTERIORES AL INCENDIO CON MODO DE POLARIZACIÓN CRUZADA HH.....	158
FIGURA 52: INTERACCIONES ENTRE DATOS SAR PREVIOS Y POSTERIORES AL INCENDIO CON MODO DE POLARIZACIÓN HV.....	158
FIGURA 53: RELACIÓN TOTAL PARA LOS DISTINTOS TIPOS DE VEGETACIÓN ENTRE DATOS DE REFLECTANCIA ÓPTICA Y DATOS SAR.	160
FIGURA 54: CICLO DE VIDA DEL SOFTWARE DE ACUERDO A LA NORMA ESA-PSS-05-0	177
FIGURA 55: EL CICLO DE VIDA TIPO CASCADA.	177

Índice de tablas

TABLA 1: REQUERIMIENTOS DE ORDEN SUPERIOR MOPRI	41
TABLA 2: REQUERIMIENTOS DE ORDEN SUPERIOR MODIIA.....	47
TABLA 3: REQUERIMIENTOS DE ORDEN SUPERIOR MODAQ	53
TABLA 4: REQUERIMIENTOS DE ORDEN SUPERIOR MOSIMI	60
TABLA 5: : MÓDULOS Y SUS OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	61
TABLA 6: I/O MOPRI_p1	70
TABLA 7: I/O MOPRI_p2.....	71
TABLA 8: I/O MOPRI_p3.....	72
TABLA 9: I/O MOPRI_p4.....	73
TABLA 10: I/O MOPRI_p5.....	74
TABLA 11: I/O MOPRI_p6.....	75
TABLA 12: I/O MOPRI_p7.....	76
TABLA 13: I/O MOPRI_p8.....	77
TABLA 14: I/O MODAQ_p1.....	78
TABLA 15: I/O MODIIA_p2.....	81
TABLA 166: PAQUETES DE R UTILIZADOS EN EL ALGORITMO DE DETECCIÓN DE EVENTOS DE INCENDIO.....	87
TABLA 177: CLASES DE DATOS DEL PAQUETE SP	90
TABLA 18: EXTRACTOS DEL CÓDIGO EMPLEADO EN LA FASE DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES PARA EL FILTRADO DE FOCOS DE CALOR.	104
TABLA 19: EXTRACTOS DEL CÓDIGO EMPLEADO EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN DE FORMAS MEDIANTE TRIANGULACIÓN DE NODOS.	108
TABLA 20: EXTRACTOS DEL CÓDIGO EMPLEADO EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN DE FORMAS MEDIANTE DIAGRAMAS DE VORONOI.....	110
TABLA 21: EXTRACTOS DEL CÓDIGO EMPLEADO EN LA FASE DE CONSTRUCCIÓN DE FORMAS MEDIANTE LA COMBINACIÓN DEL MÉTODO DE TRIANGULACIÓN DE NODOS Y DIAGRAMAS DE VORONOI.	111
TABLA 22: EXTRACTOS DEL CÓDIGO EMPLEADO EN LA FASE DE DELIMITACIÓN DE BORDES MEDIANTE EL ESTIMADOR DE FORMAS ALPHASHAPE.	113
TABLA 23: EXTRACTOS DEL CÓDIGO EMPLEADO EN LA FASE DE DELIMITACIÓN DE BORDES MEDIANTE EL ESTIMADOR DE FORMAS ALPHASHAPE. PUESTA A PRUEBA DE VALORES A.	115
TABLA 24: RESULTADOS GENERALES DE LA VALIDACIÓN DEL PRODUCTO MODIIA_p2.....	129
TABLA 25: ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS EVENTOS PREVIOS Y POSTERIORES AL INCENDIO (TEST DE STUDENT), CONSIDERANDO EL EFECTO DE DISTINTAS POLARIZACIONES SOBRE TIPOS DE VEGETACIONES DIFERENTES.....	159

Abreviaturas

A

AC: Autómata Celular, 138
AEARTE: Maestría en Aplicaciones de Alerta y Respuesta Temprana a Emergencias, 164
ALOS/PALSAR: Advanced Land Observation Satellite/Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, 153
ANP's: Áreas Naturales Protegidas, 15
APN: Administración de Parques Nacionales, 26
AQ: Áreas Quemadas, 51
ASD: A Ser Definido, 68
ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, 72
ATSR: Along-Track Scanning Radiometer, 85
AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer, 16

B

BAI: Burned Area Index, 50
BRAMS: Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System, 34

C

CBERS: Chinese Brazilian Earth Resource Satellite, 86
CGS: CONAE Ground Segment, 66
CGSS: CONAE Ground Station System, 52
CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento u Uso de la Biodiversidad, 26
CONAE: Comisión Nacional de Actividades Espaciales, 16
CRPSM: Centro di Ricerca Progetto San Marco, 24
CUSS: CONAE User Segment, 59

D

dB: Decibeles, 154
DEM: Digital Elevation Model, 57
DPF: Dirección de Producción Forestal, 17, 29

E

EEA: Estación Experimental Agropecuaria, 129
ESA: European Space Agency, 18
ETA: State-of-the-art atmospheric model, 34
EWT: Equivalent Water Thickness, 72

F

FAO: Food Administration Organization, 15
FFDI: Mc Arthur Fire Weather Index, 139
FG: Fiabilidad Global, 128
FRP: Fire Radiative Power, 45
FTP: File Transfer Protocol, 52
FWI: Fire Weather Index, 62

G

GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite, 16

GRASS: Geographic Resources Analysis Support System, 83

H

HRP: High Resolution Product, 69

I

IDE: Infraestructura de Datos Espaciales, 30

IDL: Interactive Data Language, 138

IG: Instituto Gulich, 26

IGN, 75

INDEC: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 92

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 26

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 16

IRc: Infra rojo cercano, 85

IRm: Infra rojo medio, 85

J

JRC: Joint Research Center, 152

K

KML: Keyhole Markup Language, 63

L

LST: Local Standard Time, 73

M

MCD45: MODIS Burned Area Product, 48

MNPM: Modelos Numéricos de Predicción Meteorológica, 62

MOD14: MODIS Fire Algorithm, 41

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 16

Mw: Mega Watts, 64

N

NASA: National Administration Space Agency, 26

NBR: Normalized Burned Ratio, 155

NDII: Normalized Difference Infrared Index, 50

NDVI: Normalized Diference Vegetation Index, 50

NOAA: North Oceanic Atlantic Administration, 16

O

OSS: Open Source Software, 86

P

PEA: Plan Estratégico Agroalimentario, 15

PNEF: Plan Nacional de Estadística Forestal, 15

PNQC: Parque Nacional Quebrada del Condorito, 26

ppa: procesos de puntos poisson aglomerados, 102

Q

QGIS: Quantum GIS, 83

R

R: free software environment for statistical computing and graphics, 52
RSAGA: Sistem for Automated goscientific analysis in R, 89

S

SIG: Sistema de información Geográfica, 2
SPOT: Système Pour l'Observation de la Terre, 76
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission, 71
SWIR: Infra rojo de onda corta, 85

T

T: Térmico, 85
TM: Thematic Mapper, 86
TRMM: Tropical rainfall Measuring Mission, 34

V

VIIRS: Visible Infrared Imager Radiometer Suite, 16

W

WF ABBA: Wildfire Automated Biomass Burning, 85
WMS, 156; Warehouse Management System, 63
WRF: Weather Research & Forecasting Model, 34

Capítulo I

1. Introducción General

De acuerdo al Plan Nacional de Estadística Forestal (PNEF), en Argentina se queman en promedio aproximadamente 1.5 millones de hectáreas anuales de acuerdo a las cifras obtenidas para el periodo 2001-2009 [1–9]. Las zonas más afectadas del país corresponden a la región Pampeana, Patagónica y Centro respectivamente. De acuerdo a las características de cada región, la ocurrencia de incendios está relacionada a distintas causas. La región Centro y Norte indican tener la mayor proporción de incendios causados en forma intencional (40%), las cuales están asociadas en su mayoría a la conversión de zonas naturales en áreas productivas y al manejo de pastizales para la ganadería. La negligencia es más importante en la región NEA (43%), asociadas al turismo, o a las consideradas malas prácticas ganaderas. Las causas naturales, se ubican en su mayoría en la región Pampeana (7.5%), a partir de la ignición por rayos. Además, una gran cantidad del total de las causas, para todas las regiones, son de origen desconocido (39%). La proporción de los tipos de vegetación más afectados a nivel Nacional, corresponden a Arbustales (66.5%), Pastizales (18.7%), y Bosques Nativos (14.2%), variando de acuerdo a la zona Fito geográfica afectada.

Considerando un análisis regional, la Argentina ocupa el tercer puesto en cuanto a superficie afectada en Latinoamérica, Bolivia ocupa el segundo y Brasil el primer lugar (Fire Management Working papers, 2005.FAO). Es importante destacar que la Argentina tiene una proyección de crecimiento de la producción agrícola del (-30%) para los próximos 8 años (solo considerando cultivos de granos) [10] lo que tendrá como consecuencia que 10 millones de hectáreas de tierras serán reconvertidas para un uso productivo (PEA²). En tal proceso de expansión, está implícito el uso del fuego como herramienta de manejo, lo cual impactará en el número de incendios y superficies quemadas, probablemente acentuando la proporción de incendios que actualmente son relacionados a actividades agrícolas (40%). Por otro lado, es importante tener en consideración, que para los diversos escenarios de cambio climático planteados para el futuro [11] [12], están previstos aumentos de temperatura de la superficie terrestre, lo cual tendrá de acuerdo a las características de cada ecosistema, incidencia en el nivel de riesgo de incendios, asociado a periodos de sequía prolongados [13].

Tanto la prevención, la detección, y el seguimiento de incendios, como la cuantificación de los efectos causados por el fuego para los diversos sistemas productivos y áreas naturales del país, constituyen actividades fundamentales en el ámbito de la gestión de los Recursos Naturales (RN), la producción forestal, el manejo agrícola-ganadero, la conservación y manejo de los Recursos Hídricos, y la gestión de Áreas Naturales Protegidas (ANP's). En países como Brasil, México, EE.UU y Sudáfrica, la problemática de los incendios ha sido abordada desde

distintas áreas, abarcando universidades, agencias espaciales y organismos públicos por citar algunos. Una de las mayores inversiones en tecnología para el conocimiento y el manejo de incendios, es la utilización de sensores remotos aplicados para el monitoreo de incendios (ej.: NOAA-AVHRR, GOES, MODIS y VIIRS)*. Desde la década del 80, esta tecnología viene siendo aplicada a nivel global, generando información sobre la localización de incendios en forma diaria y operativa hasta la fecha [14].

En Argentina, la CONAE a través de su plan Nacional espacial [15] ha definido al manejo de emergencias como una de las áreas prioritarias de aplicación de información espacial, abarcando éste la vigilancia y el seguimiento de emergencias y catástrofes naturales o antrópicas. Desde el año 2003 la CONAE cuenta con un sistema de detección de focos de calor provisto por el sensor MODIS, que procesa en su propia antena de captura en falda del Carmen, Córdoba. Por otro lado, el INTA, cuenta con una antena de captura ubicada en Castelar, Buenos Aires, donde procesa y provee datos sobre índices de peligrosidad de Incendios y focos de calor.

La teledetección junto a los SIG, y las tecnologías de comunicación, constituyen el conjunto de herramientas más convenientes para resolver las necesidades de la gestión de los RN [16]. La generación de productos operativos basados en dicha tecnología, tienen un gran impacto sobre la formulación de estrategias de prevención- Por ejemplo, la posibilidad de estimar cuales son las condiciones de riesgo que favorecen la ocurrencia de incendios y su propagación, significa una información indispensable para la toma de decisiones por parte de los organismos involucrados en informar y declarar situaciones de alerta y/o emergencia. Otro ejemplo importante y de gran utilidad para el manejo de incendios, es el seguimiento de los efectos producidos por el fuego a lo largo del tiempo. La teledetección se ha utilizado ampliamente para el seguimiento de las condiciones de la vegetación post-fuego a distintas escalas, principalmente para cuantificar la superficie quemada [17], determinar el nivel de severidad [18], la pérdida de cobertura vegetal [19] y la tasa de recuperación de las comunidades vegetales [20].

Es notable que en Argentina, no exista actualmente un sistema a nivel Nacional que sea centralizado capaz de cubrir con las necesidades de los diversos organismos en materia de prevención, seguimiento y cuantificación de incendios de vegetación. Los avances existentes en este contexto son aislados y con poca participación interinstitucional. El desarrollo de un sistema integrado que centralice la información y sirva como una plataforma para los diversos organismos y usuarios finales, significaría un importante avance para la gestión integral del manejo de incendios de vegetación.

1.1. Objetivos de la Tesis

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar una base metodológica para la implementación de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana que permita brindar herramientas útiles para la toma de decisión en el ámbito de la gestión de incendios de vegetación. Se ha puesto especial

énfasis en sentar las bases de un sistema integral que contemple en forma conjunta todas las etapas del ciclo de ocurrencia de incendios, proporcionando el conocimiento sobre las alternativas que ofrece la tecnología satelital para la generación de productos y aplicaciones operacionales. Todo ello planteado en el contexto de la producción de un software diseñado bajo estándares de ingeniería de software de la ESA y con tecnología de software libre. Para algunas de las fases desarrolladas, se adjuntan los códigos de implementación, junto a resultados validados.

En síntesis, la tesis describe las bases para desarrollar un sistema de alerta y respuesta temprana a incendios de vegetación, fundado en los criterios de producción de software de la ESA adoptados por CONAE. El enfoque principal del trabajo está puesto sobre el desarrollo de productos, que forman parte de las tres fases de ocurrencia de incendios: la fase previa al fuego, la fase durante y la fase post fuego. Bajo esta concepción, se logró abarcar el ciclo de ocurrencia de incendios planteado en el marco operacional del sistema propuesto. Los métodos explorados y las herramientas empleadas en este trabajo de tesis, fueron pensadas para ser reproducibles en entornos de cómputo de código libre, lo cual se espera tenga un impacto positivo sobre la posibilidad de un futuro sistema operacional.

1.2. Contexto Institucional

La iniciativa del presente proyecto está impulsada por el Instituto de Altos Estudios “Mario Gulich”(IG) en CONAE, junto a la participación inter-institucional del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la Administración de Parques Nacionales (APN), la Dirección de Producción Forestal (DPF) y alumnos y profesores de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

Potencialmente, el proyecto aspira a involucrar a todas las instituciones relacionadas al sector agro-forestal y de la gestión del Ambiente que requieran de los productos desarrollados. Se espera que los productos sean útiles en el ámbito científico como parte de las actividades de investigación que requieran el uso de datos sobre el ciclo de ocurrencia abordado por esta propuesta. Además se aspira a que los usuarios participen en forma activa en la validación y el propio desarrollo de productos.

Un esquema que resume el potencial desarrollo de la red de vinculación inter-institucional se presenta a continuación:

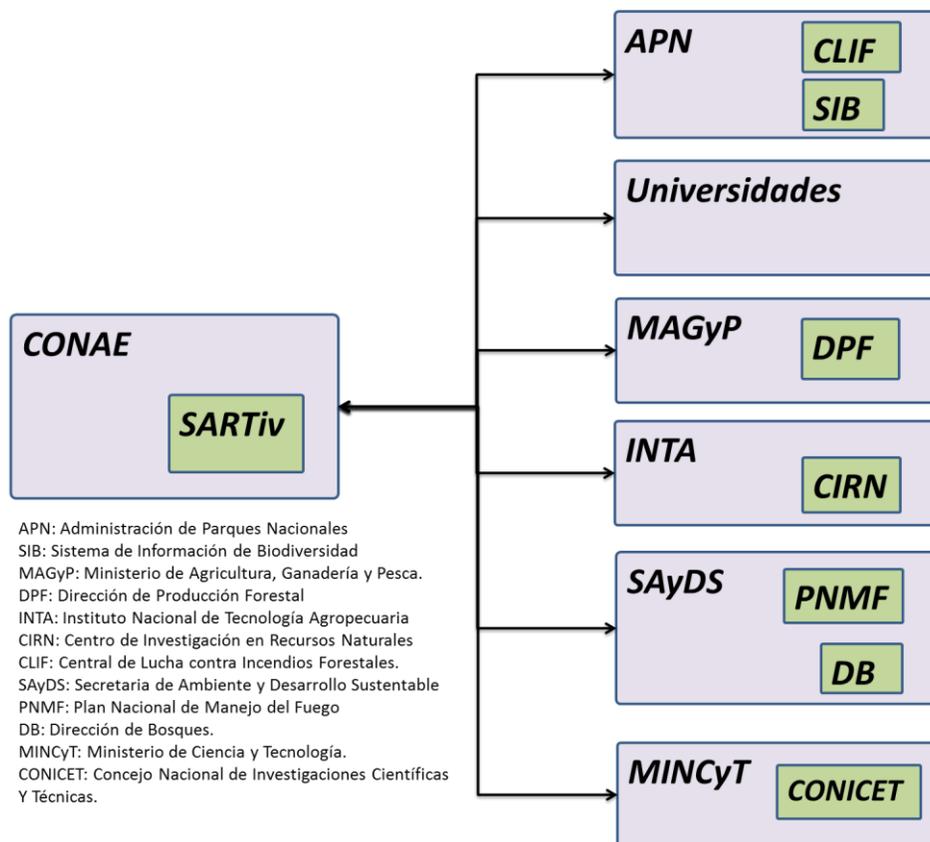


Figura 1: Red de vinculación interinstitucional.

1.3. El sistema SARTiv

El desarrollo de un sistema debe ser abordado de acuerdo a un conjunto de estándares que definen las prácticas que deben ser aplicadas a lo largo del proyecto. La CONAE la cual es una potencial institución de implementación del sistema propuesto, promueve el uso de los estándares de ingeniería de software creados por la Agencia Espacial Europea (ESA), donde quedan explícitos todos los pasos a seguir para el desarrollo de un software. Dada la gran cantidad de información que se propone procesar para responder a los objetivos de SARTiv, es imprescindible que las actividades del desarrollo del software sean sistemáticamente planeadas y llevadas a cabo con el objetivo de cumplir en tiempo y forma las obligaciones definidas para el proyecto. Por ello, el proyecto que se propone desarrollar adopta la norma ESA PSS-05-0, utilizada como una guía de aplicación sobre algunas fases que a continuación se especificarán.

El software es definido de acuerdo a estos estándares, como el conjunto de programas, procedimientos, reglas y toda la documentación pertinente asociada a la operación de sistemas de cómputo. Estos estándares tienen efecto sobre todos los aspectos del software de un

sistema, incluyendo sus interfaces con sistemas de hardware y con otros componentes del sistema.

Para llevar adelante la organización de las actividades de desarrollo se plantea aplicar un modelo de ciclo de vida del software con un enfoque de tipo catarata, el cual permite estructurar las actividades en distintas fases ejecutadas secuencialmente y además define las actividades que ocurren en cada fase [21]. Cada fase es ejecutada una vez, aunque la iteración entre fases está permitida para la corrección de errores. El ciclo de vida del software tal cual lo propone el estándar tiene 6 fases:

- Fase UR (User Requirement) - Definición de los requerimientos de usuario
- Fase SR (Software Requirement) - Definición de los requerimientos de software
- Fase AD (Architectural Design) - Definición del diseño arquitectónico
- Fase DD (Detailed Design) - Diseño detallado y producción de código
- Fase TR (Transfer) – Transferencia del software a operaciones
- Fase OM (Operations and Maintenance) – Operaciones y mantenimiento

Las primeras cuatro fases terminan con una revisión (ej.: UR/R), lo que significa que cada una de ellas es examinada antes de promover su producción. La primera actividad del ciclo de vida del software corresponde a la UR/R (Revisión de los Requerimientos de Usuario). Luego de ser aprobado el URD (User Requirement Document) se llevan a cabo las tres fases de desarrollo consiguientes, SR, AD y DD, para luego proceder a transferir el software a los usuarios. En el apéndice se presenta el cuadro con el ciclo de vida del software donde se puede observar cada una de las fases, junto al enfoque de tipo catarata. A cada una de las fases, le corresponde un documento; el cual debe ser revisado y aprobado para poder proceder con la siguiente fase.

A continuación se presentan las bases para la formulación de cada una de las fases del ciclo de vida del software definido por el estándar. Se presenta una descripción general y se especifican el cumplimiento de las actividades pertinentes a cada fase:

1.3.1. Fase UR: Definición de los requerimientos de usuario

La fase UR corresponde a la definición del problema de un proyecto de software, donde se define el alcance del software y se especifican los requerimientos de los usuarios. Toda la información identificada debe ser correctamente documentada en el URD. La revisión del URD debe de llevarse a cabo por parte de los usuarios y los desarrolladores de software y hardware conjuntamente.

La definición de los requerimientos deberá ser responsabilidad del usuario. Cada requerimiento deberá incluir un identificador, donde los requerimientos esenciales serán marcados como tales. Cada requerimiento de usuario deberá ser verificable. El URD siempre es necesario que se produzca antes de comenzar el proyecto de software. El URD además, deberá proveer una descripción general de lo que el usuario espera que el software haga. En el URD deberán estar explícitamente descritas las operaciones que el usuario quiere llevar a cabo con el sistema de software. El URD describirá las interfaces externas al sistema de software o deberá referenciarlas en el ICD (Documento de control de interfaces) que existe o ha de ser escrito.

1.3.2. Fase SR: Definición de los requerimientos de software

La fase SR corresponde a la etapa de análisis del software. Una parte vital dentro del análisis es la construcción de un modelo que describa que funcionalidades tiene, sin entrar en detalles de cómo lo tiene que hacer. El entregable principal de esta fase es el documento de requerimientos de software (SRD).

El SRD debe omitir terminología de implementación. Debe ser revisado formalmente por parte de los usuarios, por los ingenieros de software y hardware y por los administradores del proyecto durante la revisión de los requerimientos de software (SR/R).

En esta fase, el desarrollador deberá construir un modelo, independiente de la implementación, de lo que el usuario necesita. Cada requerimiento incluirá un identificador, y los requerimientos de software identificados como esenciales serán marcados. Cada requerimiento de software debe incluir una referencia que indique a cuál de los requerimientos de usuario corresponde. Cada requerimiento de software debe ser verificable. El SRD debe incluir todos los requerimientos establecidos en el URD. Se debe incluir en el SRD una tabla mostrando como los requerimientos de usuario corresponden con los requerimientos de software.

1.3.3. Fase AD: Definición del diseño arquitectónico

El propósito de la fase AD corresponde a la definición de la estructura del software. El modelo SR es transformado en un diseño arquitectónico asignando funciones a componentes de software y definiendo el control y flujo de datos entre ellos.

Esta fase puede implicar varias iteraciones del diseño, diseños alternativos de arquitecturas pueden ser propuestos, para luego seleccionar la más apropiada.

El ítem entregable que constituye la salida formal de esta fase es el documento de diseño arquitectónico (ADD). El ADD debe ser revisado formalmente por los ingenieros de hardware y

software, por los usuarios, y por el responsable de la administración del proyecto durante la revisión del diseño arquitectónico (AD/R).

Las actividades de la fase AD deben ser llevadas a cabo de acuerdo a los planes definidos en la fase SR. El desarrollador deberá construir un modelo físico, el cual describe el diseño del software utilizando terminología de implementación. Solo el diseño seleccionado será presentado en el ADD.

Para cada elemento se detallarán, los datos de entrada, las funciones a llevar a cabo y los datos de salida. Las estructuras de datos que interactúan con componentes deben ser definidas en el ADD. Las definiciones de las estructuras de datos deben incluir la descripción de cada elemento, la relación entre los elementos, el rango de valores posibles de cada elemento y los valores iniciales de cada uno. También será definido el control de flujo entre los componentes.

Los recursos necesarios en el entorno de desarrollo y en el entorno operacional serán estimados en la fase AD y definidos a posterior en el ADD, este último definirá los componentes de software más importantes y las interfaces entre ellos.

El ADD definirá o referenciará todas las interfaces externas y será completo, cubriendo todos los requerimientos de software descritos en el SRD. Se deberá incluir una tabla referenciando los requisitos de software a las partes del diseño arquitectónico, el ADD será consistente.

1.3.4. Fase DD: Diseño detallado y producción de código

El propósito de la fase DD es detallar el diseño del software, codificarlo y testarlo. El Documento de diseño detallado (DDD) y el manual de usuario del software (SUM), son producidos concurrentemente con el código y testeado. Inicialmente los DDD y SUM contienen las secciones correspondientes a los niveles superiores del sistema. A medida que el diseño progresa a niveles más bajos, las subsecciones correspondientes son agregadas. Al final de la fase, los documentos junto al código son completados, constituyendo los ítems entregables de esta fase.

Durante esta fase, las actividades de testeado del sistema, de las unidades y de integración, son llevados a cabo de acuerdo a los planes de verificación establecidos en la fase SR y AD.

Las actividades de la fase DD serán llevadas a cabo de acuerdo a los planes definidos en la fase AD. El diseño detallado y la producción de software estarán basados en los siguientes tres principios: descomposición top-down, programación estructurada y realización concurrente de la producción y documentación.

Previo a la aceptación de un módulo, cada estámen del módulo debe ser ejecutado correctamente al menos una vez, donde el test de integración deberá chequear que todos los datos intercambiados a través de las interfaces concuerden con las especificaciones de las

estructuras de datos del ADD. El test de integración deberá confirmar que los controles de flujo definidos en el ADD han sido implementados.

El test del sistema deberá chequear conformidad con los objetivos del sistema, según lo establecido en el SRD.

En el DDD se incluirá una tabla de referencias entre los requerimientos de software y el diseño detallado de los componentes.

1.3.5. Fase TR: Transferencia del software a operaciones

El propósito de esta fase es establecer si el software cumple con los requerimientos establecidos en el URD. Esto es llevado a cabo instalando el software y procediendo con los test de aceptación. Cuando el software haya demostrado proveer las capacidades requeridas, puede ser aceptado provisionalmente e iniciar las operaciones. Durante esta fase debe ser producido el documento de transferencia del software (STD) para documentar la transferencia del software al equipo de operaciones.

En los test de aceptación deben participar personal representativo de los usuarios y personal de operaciones. Las actividades de la fase TR son llevadas a cabo de acuerdo a los planes definidos en la fase DD. Los planes de la fase TR son establecidos en la fase UR y son actualizados apropiadamente. Los test de aceptación son indicados en el SVVP (Software Verification and Validation Plan). El software provisoriamente aceptado estará constituido por las salidas de las fases previas y las modificaciones que fueran encontradas en la fase TR. A continuación, el STD es entregado por los desarrolladores a la organización de mantenimiento en el momento de aceptación provisoria, el STD contendrá un resumen de los reportes de los test de aceptación y toda la documentación sobre los cambios realizados durante la fase TR.

1.3.6. Fase OM: Operaciones y mantenimiento

Una vez que el software entra en operaciones, debe ser cuidadosamente monitoreado para confirmar que cumple con todos los requerimientos definidos en el URD. Cuando el software haya pasado todos los test de aceptación, puede ser finalmente aceptado.

El documento del historial del proyecto (PHD) resume la información significativa acumulada en el curso del proyecto. Este documento debe ser publicado luego de la aceptación final. Luego de la aceptación final, el software puede necesitar ser modificado para corregir errores no detectados en las etapas de desarrollo más tempranas, o porque se suman nuevos requerimientos (mantenimiento).

Durante el periodo de operaciones, debe prestarse especial atención en mantener la documentación actualizada, y la Información relativa a los posibles fallos y errores debe ser guardada.

Deberá asignarse para cada producto de software de uso operacional una organización de mantenimiento. Es importante mantener la consistencia entre el código y la documentación. Serán asignados recursos al mantenimiento de un producto hasta que este sea retirado.

1.4. Organización de la Tesis

La tesis se organiza en función de la definición del ciclo de vida del software propuesto en base al estándar de la norma ESA PSS-05-0. Si bien no es exhaustiva la aplicación de la norma, el trabajo se priorizó para el desarrollo y diseño de productos, especialmente orientados a las fases de prevención y detección de incendios. Esta tesis busca sentar las bases fundamentales que puedan ser útiles para una aplicación operacional futura.

En el capítulo II se definen los requerimientos de usuarios de acuerdo a los distintos desarrollos definidos como prioritarios para el sistema. En primer lugar, se definen una serie de requerimientos de orden 0, donde se especifica lo que se espera del sistema en forma general. De estos requerimientos, se desprenden una serie de requerimientos de orden superior que precisan las funcionalidades esperadas por los usuarios. Las aplicaciones identificadas fueron organizadas a partir de módulos, los cuales agrupan las distintas funciones que permitirán generar los productos del sistema.

En el capítulo III se presenta la fase AD (Diseño Arquitectónico) en la cual se especifica el diseño de la arquitectura y se definen los productos a ser desarrollados. Se presenta la organización y estructura del sistema, contemplando diferentes aspectos funcionales. Se definen sub-sistemas con funcionalidades específicas, que contienen a los módulos y se describen los flujos de información.

El capítulo IV corresponde al desarrollo y diseño de productos, se presenta la metodología desarrollada para uno de los módulos definidos y el producto asociado (MoDIIA_p2) de eventos de incendios. En este capítulo se hace una descripción del estado del arte en torno a la detección de incendios activos, y se presentan la metodología desarrollada, los resultados obtenidos, su validación y conclusión.

El capítulo V corresponde al desarrollo de otro de los productos propuestos para el sistema. En este caso, se trata de una aplicación correspondiente al módulo MoPRI, donde se pone a prueba un método orientado a predecir el riesgo de propagación de incendios. El trabajo fue llevado a cabo en un área piloto sobre el PNQC. Se discute la importancia de integrar simulaciones al proceso de estimación de riesgo de incendio, y se presenta una serie de pruebas y resultados.

En el capítulo VI se presenta un trabajo orientado al desarrollo de un método de detección de área quemada mediante datos SAR y ópticos. Este capítulo, corresponde a las actividades realizadas en el marco de la tutoría de investigación de la maestría AEARTE desarrollada en el CRPSM, que culminó con una publicación en la revista *European Journal of Remote Sensing* – 2012 [22].

Finalmente el cierre de la tesis corresponde al capítulo VII, donde se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo II

2. Requerimientos

Habiendo planteado los objetivos de esta tesis e identificado el problema sobre el cual se trabajará, se presenta en este capítulo la definición de los requerimientos de usuario (UR).

Básicamente se trata de identificar que necesitan los usuarios, para poder asistir el proceso de desarrollo del proyecto de software. El procedimiento de captura de los requerimientos se basó en tres aspectos fundamentales:

- 1- La percepción espontánea sobre la necesidad de un sistema de alerta y respuesta temprana a incendios de vegetación en Argentina,
- 2- El análisis de software existentes desarrollados por otros países,
- 3- Entrevistas y reuniones con organismos nacionales que se postulan como potenciales usuarios del sistema: Administración de Parques Nacionales, y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.

El primer punto surge como una evidencia de la falta de un sistema integrado que abarque las etapas principales del ciclo de ocurrencia de incendios (*Pre-Durante-Post*). De esta primera distinción se desprenden tres grupos de actividades que definen al ambiente operacional del sistema: la planificación y manejo de incendios para la etapa *pre fuego*, la detección y el seguimiento de incendios para la etapa *durante* y el manejo de áreas quemadas y seguimiento de la regeneración para la etapa *post fuego*. De estas tres etapas las cuales cumplen con un ciclo cronológico, se identificó una cuarta fase de análisis que corresponde a la simulación del comportamiento del fuego y su propagación, la cual a su vez se consideró como parte de las actividades relativas a la planificación y manejo de la etapa pre fuego (Figura 1).

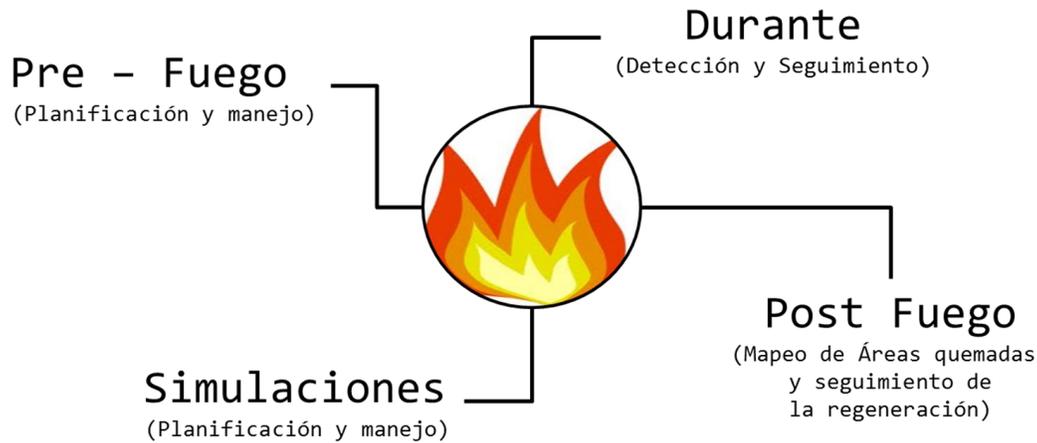


Figura 2: Esquema del ambiente operacional del sistema SARTiv

El análisis de ejemplos de software que funcionan en forma operacional, en particular los desarrollados por NASA, la CONABIO y el INPE, permitió establecer una línea de base sobre los tipos de sistemas y productos que existen en la actualidad, y de esta manera considerar la variedad de posibilidades y la tecnología disponible dentro del mundo de las aplicaciones espaciales para la gestión de incendios de vegetación.

La tercera parte determinante dentro del proceso de captura de requerimientos de usuario, fue la concertación de reuniones, talleres y salidas a campo realizadas con las instituciones contactadas para ofrecer los productos de este sistema. Por ejemplo, la APN junto a CONAE establecieron un acuerdo de trabajo, donde se especifican los compromisos de ambas instituciones en el marco del desarrollo de actividades orientadas al manejo del fuego dentro del Parque Nacional Quebrada del Condorito (PNQC). El acuerdo establecido, permitió la posibilidad de adoptar al PNQC como área piloto de las aplicaciones propuestas en esta tesis, y la de otros alumnos del IG involucrados en el proyecto. Por otra parte, se establecieron acuerdos de cooperación, aunque no formalizados aun, junto a la Dirección de Producción Forestal del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, específicamente con el responsable técnico regional de la provincia de Córdoba. Este contacto ha permitido identificar los requerimientos del sector forestal, asociados al manejo preventivo de incendios y la cuantificación de daños producidos post fuego. El sector forestal es uno de los sectores con mayores perjuicios económicos causados por el fuego, lo cual ha determinado un importante precedente de colaboración a futuro entre ambas instituciones.

En base a la definición del ambiente operacional del sistema se prepara a continuación la organización de los requerimientos y el alcance del software.

Pre-fuego

La etapa pre fuego comprende el desarrollo de índices de riesgo de incendio caracterizados de acuerdo al marco metodológico planteado por [23]. De dicha etapa se identifica como requerimiento principal **la planificación y manejo del riesgo de incendios a distintas escalas espaciales**. La aproximación se plantea como un acuerdo conceptual entre factores relativos al peligro de incendios y la vulnerabilidad.

El **peligro** se lo considera correlativo al concepto de amenaza, y se lo caracteriza como la integración de factores de ignición, y factores de propagación. Los factores de ignición a su vez son diferenciados de acuerdo a su causa (Antrópica/Natural) y de acuerdo al contenido de humedad de los combustibles.

La **vulnerabilidad** en el marco de esta tesis, se la considera como el daño potencial asociado a un complejo de valores paisajísticos y socioculturales [23–27].

En base a estas definiciones se identificó un conjunto de requerimientos de orden 0 y de orden superior, que serán presentados más adelante, con especificaciones relativas a la necesidad de contar con información referente a las condiciones de riesgo y considerando a los distintos factores involucrados. Los procesos y las actividades comprendidas para la planificación y el manejo del riesgo de incendios, corresponden al Módulo definido como “MoPRI” (Módulo de Peligrosidad y Riesgo de Incendios) el cual concentrará las funcionalidades específicas para el cumplimiento de los requerimientos de la etapa pre-fuego. (Figura 2).

Dentro de las actividades de Planificación y manejo identificadas previamente, se detectaron una serie de requerimientos referentes a las **condiciones del comportamiento de incendios y sus características de propagación**. Estos requerimientos fueron agrupados en un Módulo denominado “MoSIMI” (Módulo de simulación de Incendios) (figura 2). Las simulaciones de incendios, son una importante fuente de información de gran utilidad para los responsables de la gestión de incendios, cuerpos de bomberos especializados, administradores de parques nacionales y técnicos forestales, solo por nombrar algunos. Las simulaciones, de acuerdo a las especificaciones de los requerimientos capturados, servirían para estimar zonas de mayor frecuencia de incendios, caracterizar el comportamiento del fuego de acuerdo a las condiciones de los combustibles, la dirección del viento y las condiciones de la topografía, entre otros factores más específicos. Además, contar con un set de simulaciones parametrizadas, serviría para asociar el nivel de riesgo de determinada región, de acuerdo a las condiciones físicas del terreno. Este aspecto fue considerado con especial importancia por parte de los usuarios correspondientes a APN, por lo que se consideró como prioritario dentro del desarrollo de esta tesis.

Durante

El requerimiento principal de la etapa definida como “durante”, corresponde la ***detección y seguimiento de la ocurrencia de eventos de incendio a nivel regional***. Este requerimiento corresponde a la necesidad de contar con información precisa y actualizada sobre la ocurrencia de eventos de incendios, a partir de la cual, los usuarios puedan identificar en tiempo cuasi-real la ubicación aproximada del inicio de un evento, poder seguir su evolución temporal, lograr caracterizar las formas de las cicatrices y estimar la superficie afectada, todo ello disponible en servidores de mapas web y en archivos disponibles para uso en SIG. Este requerimiento como tal, fue identificado como de alta prioridad dentro del esquema general del sistema, por lo que tuvo un mayor desarrollo en relación al resto de los requerimientos. El Módulo responsable de ejecutar las actividades que se desprenden de tal requerimiento, fue denominado “MoDIIA” (Módulo de Detección e identificación de incendios Activos) En la figura 2, junto al resto de los requerimientos se presenta el Módulo dentro del esquema general.

Post-fuego

Correspondiente a la etapa Post-fuego, se identificó como requerimiento principal la ***detección de áreas quemadas y el seguimiento de la regeneración de las coberturas afectadas***. El Módulo responsable de cumplir con tales requisitos, fue denominado “MoDAQ” (Módulo de Áreas Quemadas).

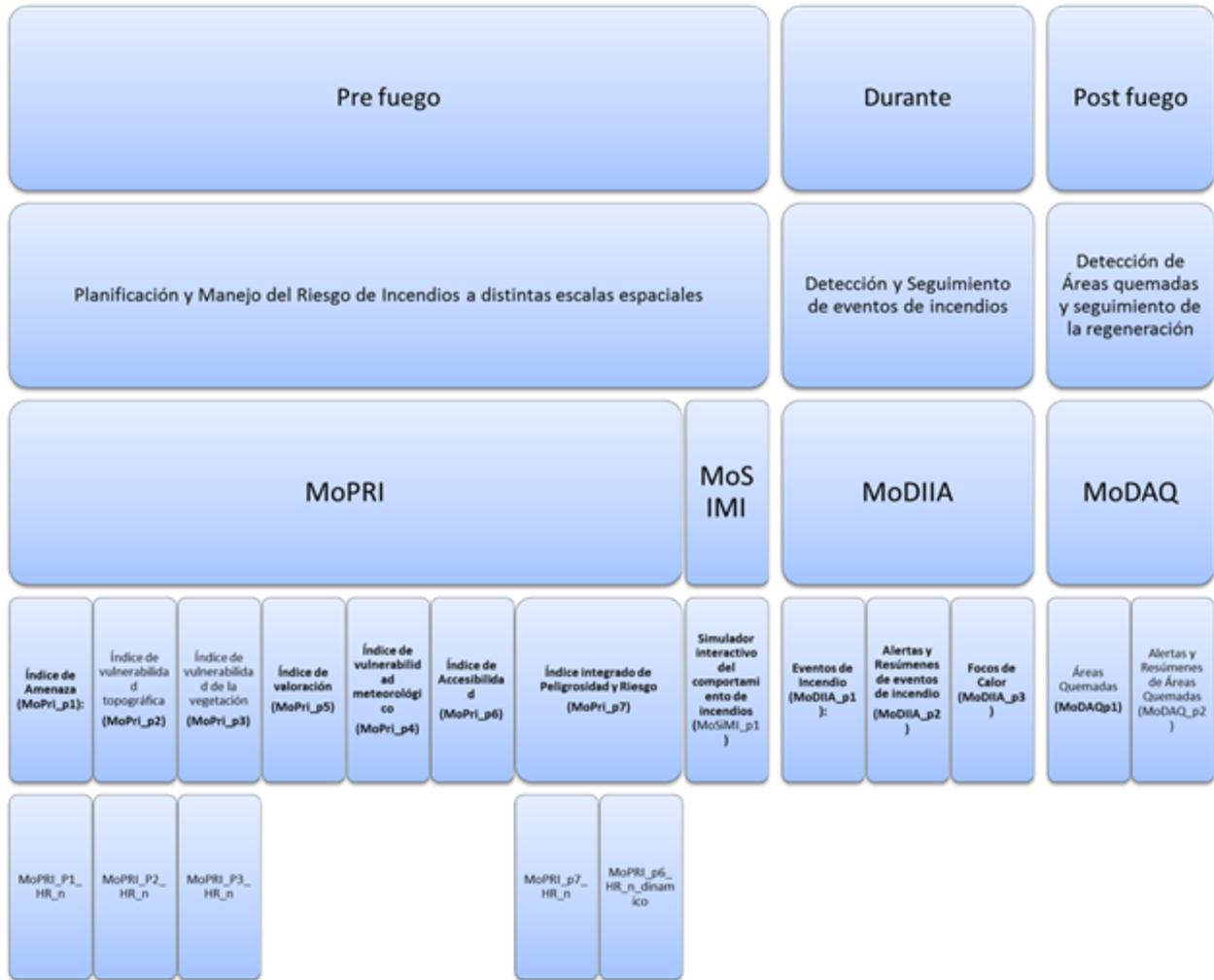


Figura 3: Esquema principal de la organización de los requerimientos de usuarios y productos definidos.

La detección de áreas quemadas ha sido un requerimiento común entre los usuarios potenciales, dada la gran utilidad que presenta el conocimiento de las superficies afectadas para los distintos sectores de usuarios. En particular, se determinó la necesidad de contar con un producto de áreas quemadas producido en forma estandarizada a distintas escalas, fundamentalmente una escala regional de moderada resolución espacial, y otra escala local de alta resolución que permita detallar con mayores precisiones los daños producidos por el fuego, determinar qué tipo de vegetación es afectada y cuales regiones del país presentan mayor incidencia de incendios. Estas necesidades fueron caracterizadas en base a un taller de coordinación realizado por la APN, y de acuerdo a entrevistas con la coordinación de la DPF de Córdoba.

En forma global, el alcance del sistema está pensado como una herramienta de monitoreo útil para la toma de decisiones en el ámbito de la prevención, el manejo y la planificación del uso del fuego a distintas escalas. A partir de la definición de los requerimientos de usuario o de orden 0, se busca detectar las necesidades concretas que presentan los usuarios del sistema, como por ejemplo, el tipo de información espacial útil para sus actividades (ej.: cartografías, simulaciones, modelos, etc.), que aplicaciones SIG utilizan o como debería ser el manejo de alertas que se puedan transmitir o se reciban en el contexto del manejo de incendios de vegetación. Contar con este tipo de información básica es fundamental para el proceso de producción del sistema, ya que se basará en tales necesidades para lograr cumplir específicamente con los requisitos establecidos, lo cual además permite identificar y relacionar las necesidades con las posibilidades y desarrollos tecnológicos actuales, finalmente para lograr obtener los productos deseados.

2.1. Conceptos básicos

La propuesta del sistema SARTiv apunta a un sistema que sea dinámico, de amplia disponibilidad para los usuarios, sin costos para organismos gubernamentales, accesible vía web, fácilmente disponible, que contemple las escalas necesarias para la planificación y el manejo de la problemática de incendios en cada ámbito, sea a nivel Municipal, Provincial, Nacional, dentro de Parques Nacionales, para productores agropecuarios o campos privados, que este basado en fuentes diversas de información espacial como datos satelitales, modelos numéricos y datos de campo, que cuente con una interfaz amigable para el usuario, que pueda ser aplicable, replicable, confiable, reutilizable, y cuyas características aseguren una amplia accesibilidad y utilización de la información, todo ello referenciado bajo los principios de gestión de datos de una infraestructura de datos espaciales (IDE) [28]

El sistema debe generar productos accesibles remotamente sobre un conjunto de herramientas web (geo portales), debe generar cartografías temáticas con información relevante al ciclo de ocurrencia de incendios descripto, debe generar estadísticas sobre incendios, reportes de situación, y alertas; con el objetivo de facilitar el acceso a información junto a los indicadores de la geografía bajo estudio a nivel local y/o regional. A parte la IDE del sistema, deberá hacer un uso mínimo de estándares, protocolos y especificaciones, todo ello definido por una política de gestión de datos. Dicha política, debe garantizar la accesibilidad de la información a través de medios sencillos de búsqueda, visualización y evaluación a través de catálogos y servidores de mapas. Además, la política de la IDE debe promover la documentación de los datos y de los atributos geográficos, con el objetivo de garantizar su aplicabilidad y confiabilidad.

A continuación se definen a continuación una serie de requerimientos de orden 0 identificados en forma global para el sistema. A posterior, se presentaran los requerimientos derivados de cada Módulo, contemplando a cada uno en forma más detallada.

2.1.1. Requerimientos de orden 0

Los requerimientos de orden 0 corresponden a una instancia general de los requerimientos del usuario del sistema. Los requerimientos se definen en términos de lo que se debe cumplir con los productos, en lugar de ser una descripción de cómo organizar el trabajo. A posterior, se describen en función de las características de cada Módulo, los requerimientos con sus respectivas tablas y descripciones sobre la base de un resumen de lo expresado arriba.

En términos globales el sistema debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- A-** El sistema debe proporcionar herramientas para la toma de decisiones en el ámbito de la prevención y la lucha contra incendios,
- B-** debe ser dinámico y de amplia disponibilidad vía web,
- C-** sin costos para organismos gubernamentales.
- D-** debe contemplar las escalas necesarias para el abordaje de la problemática de los incendios en cada ámbito (Nacional, Provincial, Municipal, Parques Nacionales),
- E-** el sistema debe generar cartografías a escala 1:1000000 (escala Nacional), y a 1:50000 (escala Municipal),
- F-** el sistema debe basarse en información de origen espacial (datos satelitales, estaciones meteorológicas, modelos de predicción), con una interfaz amigable con el usuario,
- G-** debe ser replicable y reutilizable,
- H-** los productos generados deben ser accesibles remotamente mediante geo portales,
- I-** el sistema debe estar organizado como una arquitectura modular compuesta por al menos 4 módulos que interactuaran de acuerdo a la descripción que se dará en detalle más adelante.
- J-** el sistema debe actualizar en forma diaria la información disponible de origen satelital y aquella disponible por redes de estaciones meteorológicas.
- K-** debe Integrar las cartografías generadas por cada uno de los módulos en un portal web o geo portal.

Con la definición de tales requerimientos, a continuación se presentan los objetivos generales para cada uno de los 4 módulos propuestos:

<p>Módulo de Peligrosidad y Riesgo de Incendio: MoPRI</p> <p><i>Objetivo:</i> Caracterizar el estado de peligrosidad y el riesgo de incendios a escala nacional y local de acuerdo a los componentes espaciales que determinan las condiciones de amenaza y vulnerabilidad del territorio.</p>
<p>Módulo de Simulación de Incendios: MoSIMI</p> <p><i>Objetivo:</i> Simular el comportamiento de incendios a partir de las condiciones de Amenaza y vulnerabilidad del territorio sobre zonas de interés para el usuario.</p>
<p>Módulo de Identificación de Incendios Activos: MoDIIA</p> <p><i>Objetivo:</i> Detectar e identificar eventos de incendio a nivel regional.</p>
<p>Módulo Detección de Áreas quemadas: MoDAQ</p> <p><i>Objetivo:</i> Cuantificar la superficie y el tipo de coberturas afectadas por incendios a escala Nacional y Local.</p>

A continuación se presenta el desarrollo detallado de los requerimientos de usuario para cada uno de los módulos identificados. En primer lugar se describe el marco conceptual asociado a la generación de cada producto que deben cumplir con los requerimientos establecidos por los usuarios. Posteriormente, se presenta una tabla que define los requerimientos de orden superior, los cuales describen en forma detallada lo que el usuario requiere del software.

2.2. Módulo de Peligrosidad y Riesgo de Incendio –MoPRI-

La base conceptual aplicada para el desarrollo del Módulo MoPRI contiene las definiciones sobre riesgo de Chuvieco et al., 2010. A partir de las especificaciones definidas por el autor ([ver Pre-fuego](#)), se considera al riesgo como una combinación de aspectos relativos a la peligrosidad y a la vulnerabilidad.

La peligrosidad de incendio que se propuesta para el sistema incorpora variables de origen estático y de origen dinámico, y se la considera análoga al concepto de amenaza. La peligrosidad se define como aquellas condiciones que conjuntamente determinan el peligro de ignición y el peligro de propagación de un fuego [29]. El peligro de ignición está gobernado por factores de causa, y por las condiciones del contenido de humedad de los combustibles. Los factores de causa se derivan de factores antrópicos y naturales. Entre los factores antrópicos o humanos [26], [30] se encuentra todo lo relativo a la accesibilidad, zonas de interface urbana, poblados,

zonas recreativas y centros de actividades turísticas, así como también la presencia de actividades agrícolas, el tipo de manejo productivo en zonas marginales, zonas de expansión ganadera, y otros aspectos de índole agronómica que involucra al uso del fuego como práctica de manejo. Por lo general, la identificación del factor causal de un incendio suele presentar cierta dificultad, dada la imposibilidad de predecir cuantitativamente el comportamiento humano. Sin embargo, mediante la posibilidad de caracterizar y representar cartográficamente las infraestructuras asociadas a las actividades humanas, es posible definir zonas de mayor peligro en función a la distancia a tales infraestructuras, o en función de la cantidad de eventos cercanos. Por su parte, los factores de causa natural corresponden en términos generales a la probabilidad de ignición de un incendio a causa de rayos.

El peligro de propagación está asociado a las variables que gobiernan al comportamiento del fuego [31]. Tales variables representan las características topográficas, tipos o modelos de combustibles y las condiciones meteorológicas. Las características topográficas del paisaje corresponden a la variable estática, comprendida por la altura sobre el nivel del mar, las pendientes del terreno y la exposición al sol. Las pendientes suelen representarse en porcentaje, y de acuerdo a su rango de valores, varía el nivel de peligro asociado. La regla general indica que a mayor pendiente, existe mayor peligro de propagación [32–34]. Y esto surge a partir del conocimiento de estudios empíricos que demuestran que la continuidad vertical de los combustibles en zonas de alta pendiente es mayor, promoviendo una mayor tasa de propagación de las llamas. La peligrosidad, estaría además influenciada por la cantidad de insolación que reciben las laderas y la dirección del viento predominante. La cantidad de insolación que reciben las laderas además, varía dependiendo del horario del día y la época del año, lo que determina diversas tasas de evapotranspiración de los combustibles allí localizados. La altura tiene un efecto indirecto relacionado a los pisos de vegetación presentes o la accesibilidad, como también la intensidad de los vientos.

Los combustibles, suelen clasificarse de acuerdo a modelos que se basan en diversas asociaciones de especies, características estructurales, densidad, continuidad y cobertura [35]. Suele separarse las características estructurales o morfológicas, de aquellas características fisiológicas de la vegetación. Por otro lado, los combustibles se clasifican de acuerdo al *tiempo de retardo*, un indicador del tiempo de respuesta de los combustibles frente a cambios en el medio que los rodea [36]. Además los combustibles son clasificados en vivos o muertos, lo que significa un comportamiento fisiológico distinto. A los vivos se los suele clasificar por sus características estructurales como herbáceos o leñosas, y a los muertos de acuerdo al *tiempo de retardo*. En este sentido, el contenido de humedad del combustible es una variable dinámica que determina cuán susceptible se encuentra el material combustible para quemarse o bien para facilitar la propagación del fuego. La carga de combustible (Kg/ha) es otro elemento que determina la cantidad de biomasa disponible para ser quemada [37]. Ecosistemas con cargas de combustibles elevadas, suelen presentar mayores condiciones de peligrosidad, dada a la acumulación de broza o material senescente disponible [38].

La variable meteorológica (dinámica), tiene influencia sobre el peligro de propagación. Se representa de acuerdo a la temperatura, la humedad relativa, precipitación y vientos.

Típicamente, este conjunto de variables son recolectadas por estaciones meteorológicas. La frecuencia de toma de datos es variable de acuerdo al tipo de estación/equipo y el objetivo de la colecta de datos. Las posibilidades varían desde una alta frecuencia a nivel diario (varias veces al día), o bien hasta un nivel semanal, mensual o anual. La dificultad de la toma de estas variables radica en la disponibilidad y la distribución espacial de las estaciones meteorológicas, lo que suele implicar una baja representatividad del fenómeno a escala local. Existen estaciones automáticas y manuales con distintos niveles de precisión.

Para ciertas aplicaciones orientadas a la previsión meteorológica, es común el uso de modelos numéricos de predicción meteorológica (ej.: ETA, BRAMS, WRF); Estos modelos suelen emplearse para simular la precipitación acumulada, temperatura máxima, humedad relativa y entre otras variables de interés climático, que proveen mayores facilidades para el análisis espacial de la información, en particular para aquellas zonas desprovistas de estaciones meteorológicas. Para las estimaciones de lluvia por medio de información satelital, se utiliza actualmente la información provista por el satélite TRMM –Tropical rainfall Measuring Mission-. Dicha información es acoplada a los modelos de predicción de lluvias, o bien es utilizada en forma independiente.

Otra característica que forma parte de la definición de riesgo, es la valoración de los elementos que se desean proteger de los daños del fuego. Tales elementos son de índole paisajística y socioeconómica. Comunidades vegetales de importancia para la conservación, especies animales en peligro de extinción, poblaciones humanas vulnerables, cuencas hidrográficas o valores culturales, son ejemplos de elementos de valoración. Dicha valoración, tiene el objetivo de definir acciones orientadas a prevenir su daño, lo cual tendrá además un impacto indirecto sobre el potencial de degradación que presenta determinada región.

La base conceptual adoptada, permitió establecer una serie de criterios que fueron discutidos junto a los usuarios potenciales del sistema. Algunos términos fueron desglosados y reformulados. Por ejemplo, se consideró útil homologar el término de peligrosidad a amenaza. De este modo, la amenaza representa el peligro de ignición y de propagación. El concepto de vulnerabilidad queda por definición asociado al potencial de degradación y los valores socioeconómicos y paisajísticos. El valor de riesgo de incendio queda expresado en forma global como amenaza ponderada x vulnerabilidad.

Contando con el vocabulario establecido sobre riesgo, se procedió a identificar los requerimientos de orden superior. Cada requerimiento se presenta con un identificador y está asociado a un padre, es decir que cada requerimiento puede estar asociado a otro, de acuerdo al nivel de desarrollo y complejidad. A continuación se presenta el esquema de la estructura de los requerimientos de usuario detectados para la etapa pre-fuego (Figura 3).



Figura 4: Esquema de la estructura de los requerimientos de usuarios correspondiente al módulo MoPRI.

2.2.1. Tabla de requerimientos de orden superior MoPRI

Para el Módulo MoPRI se detectaron todos aquellos requerimientos relativos a las condiciones de riesgo de incendio. La tabla que se presenta a continuación, es una extensión de cada uno de los elementos ordenados en el esquema de la figura 3.

ID Requerimiento	Descripción	Deriva de/ Comentario
UR_MoPRI_1	El sistema debe generar dos cartografías: 1) Amenaza, 2) Vulnerabilidad. (Escala Nacional y/o local)	Amenaza + Vulnerabilidad
UR_MoPRI_1.1	<p>1) Amenaza: Se compone por A) el peligro de ignición, y B) el peligro de propagación.</p> <p>A) El peligro de ignición está dado por: la distancia a indicadores de actividades humanas y causas naturales derivados de rayos, y a indicadores de las condiciones del estado hídrico de los combustibles (Humedad/ senescencia).</p> <p>B) El peligro de propagación está dado por la probabilidad de un incendio de avanzar sobre una zona de acuerdo a las condiciones de los combustibles. Puede estimarse a partir de simulaciones de propagación.</p>	<p>UR_MoPRI_1</p> <p>Amenaza</p> <p>Probabilidad de inicio y de propagación.</p>
UR_MoPRI_1.1.1	El peligro de ignición deber ser establecido de acuerdo a dos componentes: 1) la accesibilidad del territorio (ej.: Distancias a caminos, superficies de costo) e 2) indicadores del estado de la vegetación (ej.: FMC: Fuel Moisture Content o EWT: Equivalent Water Thickness).	<p>UR_MoPRI_1.1.</p> <p>Ignición</p>
UR_MoPRI_1.1.1.1	La Accesibilidad deberá al menos incluir posibles fuentes de ignición o supresión: Caminos, zonas de interface urbana, poblados, zonas recreativas y centros de actividades turísticas, zonas de actividades agrícolas, tipo de manejo	<p>UR_MoPRI_1.1.1</p> <p>Accesibilidad</p>

	productivo, zonas marginales, zonas de expansión ganadera, cuerpos de bomberos, etc.	
UR_MoPRI_1.1.1.2	Los indicadores del estado de la vegetación, deberán ser determinados de acuerdo a un seguimiento temporal de las condiciones del estado hídrico / senescencia de los combustibles. Tales indicadores deben incorporar cartografías de modelos de combustibles y se debe definir las clases de material muerto y vivo. De acuerdo a la aproximación escogida, cada tipo de material deberá ser tratado en forma independiente. El material muerto debe ser clasificado de acuerdo al <i>tiempo de retardo</i> y el material vivo debe ser clasificado en herbáceo y/o leñoso.	UR_MoPRI_1.1.1 Condiciones hídricas/ senescencia de los combustibles.
UR_MoPRI_1.1.2	El peligro de propagación está dado por la probabilidad de un incendio de avanzar sobre una zona de acuerdo a las condiciones del terreno. El peligro de propagación debe ser establecido a partir de simulaciones de incendios. Estas simulaciones pueden incluir parámetros relativos a la dirección del viento, modelos de combustibles y características topográficas. El método puede implicar el uso de autómatas celulares o el uso de software específico (Ej.: Farsite). El peligro puede establecerse de acuerdo a la frecuencia de incendios simulados por unidad de superficie.	UR_MoPRI_1.1 Propagación
UR_MoPRI_1.2	2) Vulnerabilidad: Se forma por tres	UR_MoPRI_1

	componentes: 1) La valoración socioeconómica de los recursos, 2) la valoración del paisaje y 3) el potencial de degradación.	Valoración y potencial de degradación.
UR_MoPRI_1.2.1	La valoración socioeconómica corresponde principalmente a los valores de daño potencial de productos madereros, y la pérdida económica al turismo y actividades recreacionales.	UR_MoPRI_1.2 Valoración de recursos socioeconómicos en riesgo.
UR_MoPRI_1.2.2	La valoración del paisaje es dependiente de la escala. Los elementos prioritarios de valoración comprenden comunidades vegetales de importancia para la conservación, especies animales en peligro de extinción, poblaciones humanas vulnerables, cuencas hidrográficas, ANP'S, valores histórico/culturales, propiedad privada, entre otros. El análisis puede implicar el uso de estadísticas oficiales o capas de información temática existente.	UR_MoPRI_1.2 Valoración de recursos paisajísticos en riesgo.
UR_MoPRI_1.2.3	El potencial de degradación corresponde a la respuesta de la vegetación a los efectos del fuego. Contempla la estimación de severidad o daño de las comunidades vegetales quemadas. Aproximaciones pueden incluir el uso de datos ópticos y SAR.	UR_MoPRI_1.2 Degradación: Efectos del fuego sobre la vegetación
UR_MoPRI_1.3	El sistema debe poder interpretar datos provistos por modelos numéricos de predicción meteorológica. Deberá además poder incorporar datos de la red de estaciones meteorológica disponible en el país (Ej.: SMN, INTA). El sistema deberá poder	UR_MoPRI_1.1 Integración de datos espaciales de diversas fuentes y formatos

	procesar información de origen satelital. La información meteorológica deberá ser integrada a la información de origen satelital.	
UR_MoPRI_2	Las tecnologías utilizadas serán elegidas para maximizar su utilidad/utilización	Tecnologías
UR_MoPRI_2.1	El sistema deberá poder ser gratuito para los usuarios	UR_MoPRI_2 Gratuidad
UR_MoPRI_2.2	El sistema debe ser diseñado sobre software libre	UR_MoPRI_2 Código Libre
UR_MoPRI_2.2.1	El sistema deberá correr sobre el sistema operativo Linux.	UR_MoPRI_2.2
UR_MoPRI_3	El sistema debe funcionar en el ámbito del CUSS (CONAE User's Segment Service).	CUSS
UR_MoPRI_3.1	El sistema deberá recibir la información satelital de los sistemas de ingestión de datos CGSS (CONAE Ground Station Service) en un nivel 1B (Calibrados y geo localizados).	UR_MoPRI_3 Datos
UR_MoPRI_3.2	El sistema debe generar productos de manera tan automática como sea posible.	UR_MoPRI_3 Automatismo
UR_MoPRI_3.3	El sistema debe estar diseñado bajo estándares y normas de la ESA adoptadas por CONAE.	UR_MoPRI_3 Estándar
UR_MoPRI_3.4	El sistema deberá ser construido como un conjunto de unidades de procesamiento modular.	UR_MoPRI_3 Diseño modular
UR_MoPRI_3.5	El sistema debe generar productos de manera operativa.	UR_MoPRI_3 Operatividad

UR_MoPRI_3.5.1	Los productos del Módulo MoPRI deben ser generados a partir de la secuencia de procesos específicos previamente definidos y documentados.	UR_MoPRI_3.5 Módulo
UR_MoPRI_3.6	Los formatos de salidas deberán ser archivos shapefile para los vectores y geotiff para los raster.	UR_MoPRI_3 Formatos
UR_MoPRI_4	El sistema deberá generar un índice integrado de riesgo a partir de las dos capas de información previamente descritas (Amenaza y vulnerabilidad) (UR_MOPRI_1), mediante la aplicación de un algoritmo adaptado a la región.	Índice integrado (A x V)
UR_MoPRI_4.1	El mismo debería dar un valor mayor cuanto mayor sea el riesgo. Incorporando dentro de la vulnerabilidad la valoración de los activos en cuestión y las posibilidades de contrarrestar el efecto dañino mediante intervención humana.	UR_MoPRI_4 Niveles
UR_MoPRI_5	Los productos derivados del Módulo MoPRI deberán estar disponibles vía un servidor cartográfico <i>on line</i> para su accesibilidad continua (geo portales).	Servicios Web
UR_MoPRI_5.1	Deberá incluir funcionalidades básicas tales como: Zoom – medición – consultas puntuales- download de datos, etc.	UR_MoPRI_5 Funcionalidades
UR_MoPRI_5.2	Download – shapes y jpg's, geotiff's y kml's. Posibilidad de descarga	UR_MoPRI_5 Descarga de datos

UR_MoPRI_5.3	Print – pdf/jpg Posibilidad de impresión	UR_MoPRI_5 Impresión de datos
UR_MoPRI_5.4	Quiklooks Posibilidad de pre visualización	UR_MoPRI_5 Visualización

Tabla 1: Requerimientos de orden superior MoPRI

2.3. Módulo de Detección e Identificación de incendios activos: MoDIIA

Los requerimientos definidos para el Módulo MoDIIA corresponden a las actividades de *detección y seguimiento de la ocurrencia de eventos de incendio a nivel regional*. De aquí se desprende el objetivo general orientado a la detección e identificación de eventos de incendio.

El Módulo comprende la utilización de focos de calor MODIS como datos de entrada para la generación de eventos de incendios. Por definición, la detección de focos de calor se basa en la capacidad de un sensor remoto de capturar la energía emitida por la superficie terrestre en las longitudes de onda correspondientes al infrarrojo medio y térmico. De acuerdo a las temperaturas emitidas por los incendios (entre 300 °C y 1500 °C), se establecen los umbrales de temperatura que permiten detectar los frentes de fuego activos [14], [39]. El proceso de detección es influenciado por una diversidad de factores, que comprenden al tipo de vegetación quemada, el nivel de combustible acumulado, las condiciones ambientales, y cuestiones relativas a la geometría de observación de la plataforma satelital. Cada foco que se detecta activo (en llama) al momento del registro de la imagen, es representado sobre la superficie terrestre mediante la coordenada central del pixel. El tamaño de pixel MODIS correspondiente a los canales térmicos es de 1000 mts. de lado, lo cual representa una superficie de 10.000 mts cuadrados (1 ha.)

En la CONAE se procesas focos de calor a partir de la versión original del algoritmo MOD14 desarrollado por [39]. A lo largo de los últimos años, el algoritmo MOD14 ha pasado por diversas pruebas y validaciones que han resultado en mejoras sobre su capacidad de detección. La colección 5 (C5) es el producto de focos de calor actual, el cual, provee mejoras en cuanto a la calidad de detección de incendios pequeños [40]. El Módulo MoDIIA pretende funcionar a partir de la versión C5 del MOD14, para lo cual requerirá su actualización dentro de la rutina de procesamiento de CONAE.

El Módulo además de considerar la actualización del algoritmo MOD14 para su uso, pretende ser flexible para poder incorporar datos de otras plataformas, como GOES y NOAA-AVHRR, y en particular los provistos por el sensor VIIRS, el cual corresponde a la nueva generación de sensores que a futuro continuará con el monitoreo de incendios en la era post MODIS.

La aplicación principal para el Módulo MoDIIA, se basa en la utilización de focos de calor para el agrupamiento de focos que corresponden a un mismo evento de incendio. El término eventos de incendio se considera para nuestra aplicación, como el conjunto de focos de calor que presenta una mayor densidad, determinada por una asociación espacio temporal. La identificación de eventos de incendio ha sido investigada por varios autores con el fin de lograr obtener información más acertada en cuanto a las características de un incendio. Por ejemplo, algunos autores intentaron identificar la ubicación del centro del evento, la forma de su perímetro y su tamaño aproximado [41–43].

La aplicación intenta producir dos productos principales. Por un lado, 1) convertir los focos de calor procesados en CONAE a formatos SIG (Ej.: shapefiles), y ponerlos a disponibilidad de los usuarios sobre un geo-portal. Tal aplicación facilitaría el uso de los datos que provee CONAE actualmente permitiendo que el usuario pase de tener un archivo de texto (.txt) correspondiente a cada observación, a un archivo (.shp) listo para su intervención en un SIG.

Por otro lado como se especificó arriba, el producto principal para el Módulo MoDIIA corresponde al 2) producto de eventos de incendio. Dicho producto surgió como un requerimiento asociado a la necesidad de contar con mayores precisiones sobre la capacidad de detectar las características de un incendio. El análisis detallado de la literatura especializada, indica sobre las limitaciones de representación que presentan los focos de calor para tal caracterización, en particular las características relativas a formas y tamaño.

En forma general, los requerimientos asociados al producto 2) que se identificaron están relacionados a los siguientes atributos principales (2.3.1):

- 1- Perímetro de cada evento de incendio identificado,
- 2- número de focos de calor agrupados,
- 3- fecha de inicio y fin del evento,
- 4- nombre de las plataformas satelitales involucradas
- 5- número de días transcurridos del evento.
- 6- Adicionalmente, se espera lograr caracterizar el tipo de vegetación afectado, y su ubicación geográfica de acuerdo a la zona correspondientes (Municipio/Provincia/País).

A continuación se presenta el esquema sobre la estructura de los UR correspondiente al módulo MoDIIA:

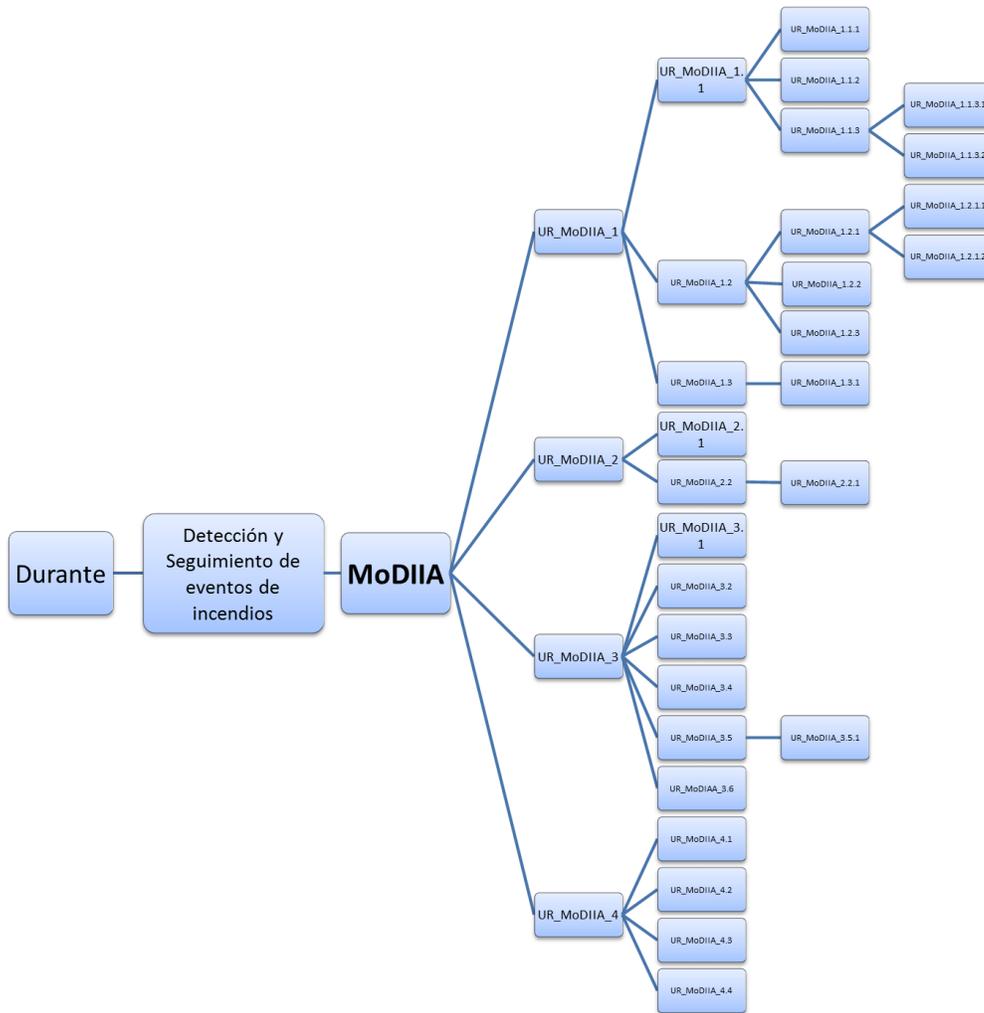


Figura 5: Esquema de la estructura sobre los requerimientos de usuarios correspondiente al módulo MoDIIA.

Los elementos del esquema anterior, son precisados en detalle en la tabla que se presenta a continuación:

2.3.1. Tabla de requerimientos de orden superior MoDIIA

ID Requerimiento	Descripción	Deriva de/ Comentario
UR_MoDIIA_1	El sistema deberá generar información en tiempo cuasi real sobre “Eventos de incendios” basados en información espacial	Temporalidad de detección de incendios.
UR_MoDIIA_1.1	El sistema debe utilizar los datos de focos de calor (presencia/ ausencia de anomalías térmicas). Esto puede corresponder al actual producto de CONAE o a su versión más actual.	UR_MoDIIA_1 Focos da calor MODIS (MOD14) C5.
UR_MoDIIA_1.1.1	El producto anterior debe estar disponible en formato vectorial (shapefiles), y raster (geotiff).	UR_MoDIIA_1 Formato
UR_MoDIIA_1.1.2	El sistema debe permitir al usuario acceder remotamente al producto de eventos de incendio en un geo portal. El producto de focos de calor, también debe estar disponible junto a otras capas de interés geográfico.	UR_MoDIIA_1 Geo-portal
UR_MoDIIA_1.1.3	El sistema deberá poder identificar eventos de incendio mediante la agrupación de focos de calor espacial y temporalmente correlacionados.	UR_MoDIIA_1 Generación de Clúster
UR_MoDIIA_1.1.3.1	Los eventos deben tener los siguientes atributos: 1) Coordenada central 2) número de focos de calor agrupados, 3) La fecha de inicio y fin del agrupamiento,	UR_MoDIIA_1.1.3 Atributos de los eventos

	<p>4) las plataformas satelitales involucradas.</p> <p>5) y el número de días</p>	
UR_MoDIIA_1.1.3.2	El sistema deberá poder cuantificar la cantidad de energía liberada por el evento de incendio, promediando los valores de FRP de los focos de calor del cluster (datos únicamente disponibles en la colección 5).	<p>UR_MoDIIA_1.1.3</p> <p>(dependiente de la versión del algoritmo MOD14)</p> <p>Energía liberada por el evento de incendio.</p>
UR_MoDIIA_1.2	El sistema deberá generar reportes locales (con caracterización del ambiente circundante al evento detectado).	<p>UR_MoDIIA_1</p> <p>Reportes vía e-mails y disponibles en un sitio web.</p>
UR_MoDIIA_1.2.1	Debe incorporar Información complementaria superpuesto a los eventos de incendio	<p>UR_MoDIIA_1.2</p> <p>Información auxiliar</p>
UR_MoDIIA_1.2.1.1	Deberá incorporar cartografía temática	UR_MoDIIA_1.2.1
UR_MoDIIA_1.2.1.2	Deberá incorporar otra información como meteorológica	UR_MoDIIA_1.2.1
UR_MoDIIA_1.2.2	El sistema deberá permitir el registro de usuarios que puedan personalizar una consulta que produzca un informe “a medida”, donde el usuario pueda elegir el área de trabajo, período de tiempo y productos asociados, periodicidad de actualización, destino del informe, entre otros atributos.	<p>UR_MoDIIA_1.2</p> <p>Producción de reportes a la medida del usuario</p>
UR_MoDIIA_1.2.3	El sistema deberá poder distribuir los productos generados a diferentes plataformas (ej.: Gvsig mobile, SMS, Google maps, quantum gis. etc.)	<p>UR_MoDIIA_1.2</p> <p>Distribución de reportes a diversos destinatarios</p>

UR_MoDIIA_1.3	El sistema deberá poder generar un alerta de incendio para un área de interés previamente identificada por un usuario, vía distintos formatos y medios de distribución.	Alertas
UR_MoDIIA_1.3.1	El sistema debe permitir al usuario elegir obtener vía SMS la posición GPS del frente de un incendio, y la posible dirección y velocidad de propagación en relación a un punto de referencia pre establecido por el propio usuario.	UR_MoDIIA_1.3 SMS
UR_MoDIIA_2	Las tecnologías utilizadas serán elegidas para maximizar su utilidad/utilización	Tecnologías
UR_MoDIIA_2.1	El sistema deberá poder ser gratuito para los usuarios	UR_MoDIIA_2 Gratuidad
UR_MoDIIA_2.2	El sistema debe ser diseñado sobre software libre (Ej.: R)	UR_MoDIIA_2 Código abierto
UR_MoDIIA_2.2.1	El sistema deberá correr sobre el sistema operativo Linux.	UR_MoDIIA_2.2 Linux
UR_MoDIIA_3	El sistema debe funcionar en el ámbito del CUSS.	CUSS
UR_MoDIIA_3.1	El sistema deberá recibir la información satelital de los sistemas de ingestión de datos de CONAE en un nivel 1B (Calibrados y geo localizados) provistos por el sensor MODIS en una primera etapa, en una segunda etapa GOES de acuerdo a la disponibilidad en CONAE.	UR_MoDIIA_3 Datos
UR_MoDIIA_3.2	El sistema debe generar productos de manera tan automática como	UR_MoDIIA_3

	sea posible.	Automatismo
UR_MoDIIA_3.3	El sistema estar diseñado bajo estándares y normas de la ESA adoptadas por CONAE	UR_MoDIIA_3 Estándar
UR_MoDIIA_3.4	El sistema deberá ser construido como un conjunto de unidades de procesamiento específico.	UR_MoDIIA_3 Diseño modular
UR_MoDIIA_3.5	El sistema debe generar productos de manera operativo.	UR_MoDIIA_3 Operatividad
UR_MoDIIA_3.5.1	Los productos MoDIIA deben ser generados a partir de la secuencia de procesos específicos previamente definidos y documentados	UR_MoDIIA_3.5
UR_MoDIIA_3.6	Los formatos de salidas deberán ser shapefile para los vectores y geotiff para los raster	UR_MoDIIA_3 Formato
UR_MoDIIA_4	Los productos MODIIA deberán estar disponibles vía un servidor cartográfico SIG <i>on line</i> para su accesibilidad continua.	Servicios web
UR_MoDIIA_4.1	Funcionalidades básicas tales como:Zoom – medición – consultas puntuales-	UR_MoDIIA_4
UR_MoDIIA_4.2	Download – shapes, geotiff y kml.Posibilidad de descarga	UR_MoDIIA_4
UR_MoDIIA_4.3	Print – pdf/jpg- Posibilidad de impresión	UR_MoDIIA_4
UR_MoDIIA_4.4	Quiklooks, posibilidad de pre visualización	UR_MoDIIA_4

Tabla 2: Requerimientos de orden superior MoDIIA

2.4. Módulo Detección de Áreas quemadas: MoDAQ

El objetivo del Módulo MoDAQ es detectar con precisión la superficie afectada por incendios y determinar el tipo de coberturas quemadas. La aplicación surge como la necesidad de obtener en forma periódica y a partir de un proceso estandarizado, estimaciones de área quemada a nivel regional (país), y a nivel local (Municipal).

En un sentido más amplio, la estimación de áreas quemadas, tiene el objetivo de determinar el daño ecológico causado por los incendios, y como un objetivo secundario la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero. El daño, para el criterio de esta tesis, se traduce como la cantidad de superficie afectada y el tipo de vegetación impactado. Relacionado al daño está el concepto de severidad, la cual se la considera como un parámetro relativo al nivel de consumo de la vegetación o pérdida de biomasa. Tanto el daño como la severidad suelen considerarse análogos de acuerdo a la literatura [44].

Uno de los aspectos más relevantes obtenidos de las reuniones llevadas a cabo con los potenciales usuarios del sistema, fue deducir la falta de datos consistentes sobre la distribución y la cantidad de superficies quemadas a nivel Nacional. Se constató que existen productos de Área quemada disponibles a nivel global (Ej.: MCD45, Globscar, GBA2000), pero que no son confiables de acuerdo al levantamiento bibliográfico realizado [45].

Otro aspecto que expresaron los usuarios, es la relevancia de la información sobre áreas quemadas [40] para poder establecer una planificación más precisa de las actividades orientadas a la rehabilitación de las áreas afectadas, al menos como un proceso previo a un programa de rehabilitación in situ.

Por lo general, el trabajo a campo necesario para la estimación de áreas quemadas, demanda una gran cantidad de tiempo, medios económicos y el asesoramiento de expertos. Contar con una estimación del área quemada por medio de información satelital y además que sea gratuita, tiene un gran impacto desde el un punto de vista práctico y sobre la economía de los responsables de gestionar tales actividades. Tales afirmaciones representan un componente importante de los requerimientos de este módulo.

En síntesis, un producto de área quemada de origen satelital, debería cumplir con las siguientes funciones:

- 1) Obtener información de la superficie total quemada,
- 2) cuantificar la cantidad de incendios y sus características (tamaño y perímetro),
- 3) determinar patrones espaciales y dinámicas temporales asociadas al tipo de vegetación afectado,

- 4) determinar los niveles de daño que ocasionan los incendios,
- 5) y proporcionar un componente fundamental para la estimación de emisiones de gases de efecto invernadero.

Se presenta a continuación el esquema de la estructura de los UR para el módulo MoDAQ:

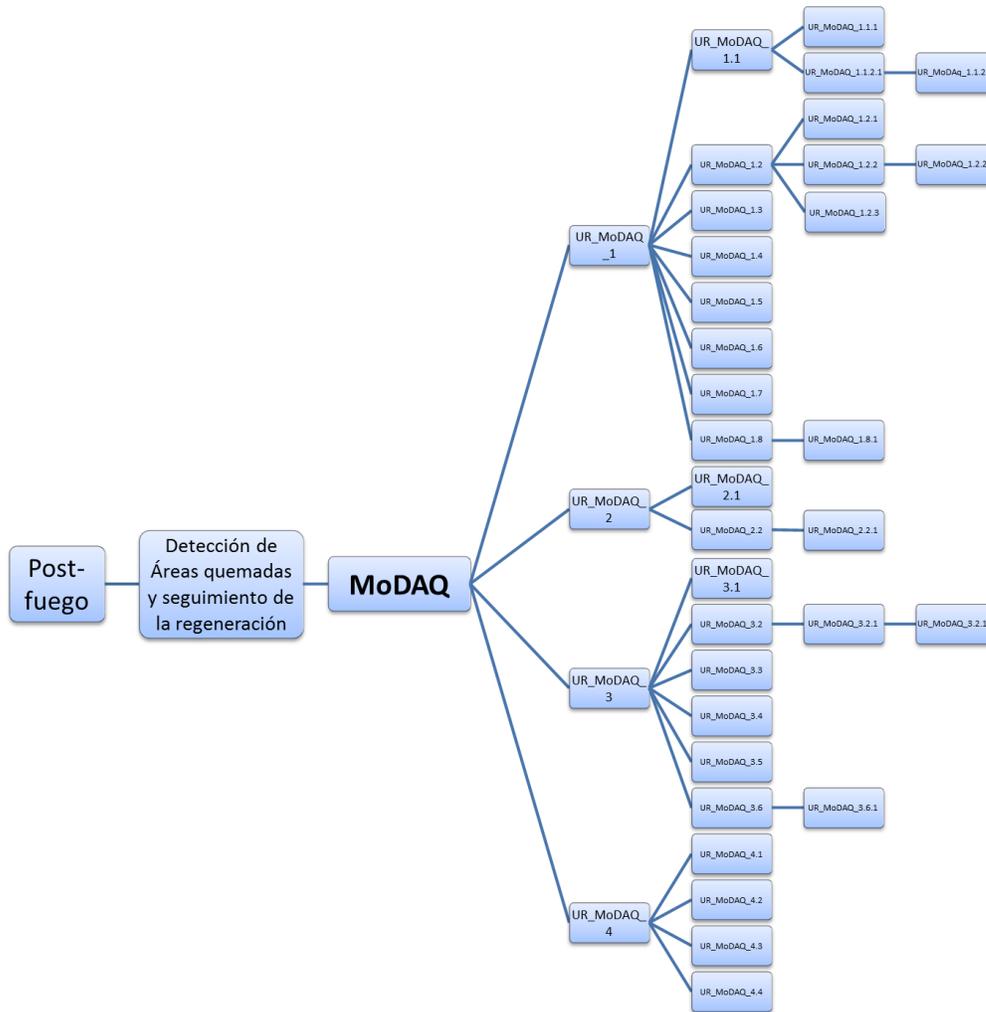


Figura 6: Esquema de la estructura sobre los requerimientos de usuarios correspondiente al módulo MoDAQ.

En base a la definición de los requerimientos del esquema anterior se presentan a continuación la descripción detallada de cada uno de los elementos:

2.4.1. Tabla de requerimientos de orden superior MoDAQ

ID Requerimiento	Descripción	Padre/ Comentario
UR_MoDAQ_1	El sistema debe generar información sobre Áreas quemadas en las escalas correspondientes (Nacional y/o local) basados en información espacial.	
UR_MoDAQ_1.1	El sistema debe generar una capa de información binario quemado/no quemado que represente las zonas afectadas y no afectadas por fuego.	UR_MoDAQ_1 Detección de cicatriz quemada
UR_MoDAQ_1.1.1	El sistema debe calcular índices espectrales en base a información satelital (Ej.: NBR, NDVI, BAI) que contribuyan a delimitar el área afectada por fuego.	UR_MoDAQ_1.1 Calculo de índices espectrales
UR_MoDAQ_1.1.2	El sistema debe emplear umbrales de corte ajustados a la región ecológica afectada para los índices calculados.	UR_MoDAQ_1.1 Valores umbrales de corte
UR_MoDAQ_1.1.2.1	El sistema debe integrar información de regiones ecológicas (ecoregiones).	UR_MoDAQ_1.1.2 Ecoregiones
UR_MoDAQ_1.2	El sistema debe contar con una capa de información de coberturas no combustibles (ej.: Cuerpos de agua, suelos desnudos) que represente las zonas no susceptibles a ser quemadas.	UR_MoDAQ_1.1 Detección de zonas no combustibles
UR_MoDAQ_1.2.1	El sistema debe calcular índices espectrales en base a información satelital (ej.: NDII, NDVI) que contribuyan a delimitar áreas no	UR_MoDAQ_1.2 Valores umbrales de corte

	combustibles.	
UR_MoDAQ_1.2.2	El sistema debe emplear con umbrales de corte ajustados a la región ecológica afectada a partir de los índices calculados.	UR_MoDAQ_1.2 Umbrales
UR_MoDAQ_1.2.2.1	El sistema debe integrar información de regiones ecológicas (Ecoregiones).	UR_MoDAQ_1.2.2 Ecoregiones
UR_MoDAQ_1.2.3	El sistema debe detectar la presencia de nubes y enmascararlas.	UR_MoDAQ_1.1 Nubes
UR_MoDAQ_1.3	Las AQ deberían dar valor 1 para zonas quemadas y 0 para zonas no quemadas. Incorporando dentro de la zona quemadas solo aquellas coberturas potencialmente combustibles.	UR_MoDAQ_1.1 Valores
UR_MoDAQ_1.4	El sistema deberá ser capaz de generar datos de superficie quemada, perímetro afectado, tipos de vegetación afectada, tiempo de duración del evento, ubicación geográfica.	UR_MoDAQ_1 Cuantificación
UR_MoDAQ_1.5	Los productos MoDAQ deberán producirse con una frecuencia mensual.	UR_MoDAQ_1 Frecuencia de actualización
UR_MoDAQ_1.6	Los productos mensuales deben estar disponibles en un acervo de información histórica de al menos 1 año.	UR_MoDAQ_1 Almacenamiento de productos
UR_MoDAQ_1.7	Los productos del MoDAQ deben ser rigurosamente validados con información satelital de alta resolución y/o datos tomados a campo.	UR_MoDAQ_1 Validación

UR_MoDAQ_1.8	El sistema debe incorporar información de focos de calor dentro del proceso de detección de Área quemada.	UR_MoDAQ_1.1 Focos MODIS
UR_MoDAQ_1.8.1	El sistema debe utilizar la información de focos de calor provista por el algoritmo MOD14.	UR_MoDAQ_1.8
UR_MoDAQ_2	Las tecnologías utilizadas serán elegidas para maximizar su utilidad/utilización	Tecnologías
UR_MoDAQ_2.1	El sistema deberá poder ser gratuito para los usuarios	UR_MoDAQ_2 Gratuidad
UR_MoDAQ_2.2	El sistema debe ser diseñado sobre software libre (Era)	UR_MoDAQ_2 Código abierto
UR_MoDAQ_2.2.1	El sistema deberá correr sobre el sistema operativo Linux.	UR_MoDAQ_2.2 Linux
UR_MoDAQ_3	El sistema debe funcionar en el ámbito del CUSS.	CUSS
UR_MoDAQ_3.1	El sistema deberá recibir la información satelital de los sistemas de ingestión de datos de CGSS (CONAE Ground Station System) en un nivel 1B (Calibrados y geo localizados).	UR_MoDAQ_3
UR_MoDAQ_3.2	El sistema además debe poder incorporar información satelital de otras fuentes ajenas a CONAE	Datos
UR_MoDAQ_3.2.1	El sistema debe poder conectarse a servidores web que provean información satelital.	UR_MoDAQ_3.2
UR_MoDAQ_3.2.1.1	El sistema debe contar con accesos FTP y otros de alta velocidad de transferencia	UR_MoDAQ_3.2.1

UR_MoDAQ_3.3	El sistema debe generar productos de manera tan automática como sea posible.	UR_MoDAQ_3
UR_MoDAQ_3.4	El sistema estar diseñado bajo estándares y normas de la ESA adoptadas por CONAE.	UR_MoDAQ_3
UR_MoDAQ_3.5	El sistema deberá ser construido como un conjunto de unidades de procesamiento específico.	UR_MoDAQ_3
UR_MoDAQ_3.6	El sistema debe generar productos de manera operativa.	UR_MoDAQ_3
UR_MoDAQ_3.6.1	Los productos MoDAQ deben ser generados a partir de la secuencia de procesos específicos previamente definidos y documentados	UR_MoDAQ_3.5
UR_MoDAQ_4	Los productos MoDAQ deberán estar disponibles vía un servidor cartográfico <i>on line</i> para su accesibilidad continua.	
UR_MoDAQ_4.1	Funcionalidades básicas tales como: Zoom – medición – consultas puntuales-	UR_MoDAQ_4
UR_MoDAQ_4.2	Download – shapes, geotiff, kml y otros formatos SIG.	UR_MoDAQ_4
UR_MoDAQ_4.3	Print – pdf/jpg	UR_MoDAQ_4
UR_MoDAQ_4.4	Quiklooks	UR_MoDAQ_4

Tabla 3: Requerimientos de orden superior MoDAQ

2.5. Módulo de Simulación del comportamiento de Incendios: MoSimi

La simulación de incendios responde a la necesidad de obtener información sobre las características de comportamiento de un incendio de acuerdo a las condiciones ambientales del territorio. La modelización matemática[46] es clave para estudiar la dinámica de un incendio, ya

que contribuye a entender mejor la realidad física, ayuda a descubrir estructuras organizadas y nuevos comportamientos en los sistemas, y permite el desarrollo de herramientas de cálculo [47] como soporte en la toma de decisiones en materia de prevención y extinción [48][49].

Los modelos matemáticos de incendios forestales son, genéricamente, un conjunto más o menos amplio de ecuaciones, planteadas a partir de balances teóricos o de observaciones experimentales, o por ambos medios, cuya solución proporciona la evolución temporal y/o espacial de una o diversas variables, como por ejemplo, la velocidad de propagación, la intensidad lineal del frente o el consumo de combustible, a fin de determinar el comportamiento físico de un sistema determinado

Gracias a la evolución de los sistemas de cómputo y la gran experiencia que durante los últimos años se ha obtenido, algunos de los modelos desarrollados han alcanzado buenos niveles de operatividad y extrapolación, como por ejemplo, el software FARSITE [50] .

El Módulo MoSIMi tiene como objetivo principal simular el comportamiento de un incendio a partir de las condiciones de riesgo de la zona de interés. Los componentes de riesgo también corresponden a la amenaza y vulnerabilidad. Específicamente, las simulaciones deberían dar como resultado estimaciones sobre la dirección y velocidad con la que se podría propagar un incendio en una determinada región, así como estimar la superficie afectada. Esta información debería representar una herramienta de apoyo a la hora de prevenir y de combatir un siniestro de esta naturaleza, o bien en la planificación de actividades preventivas.

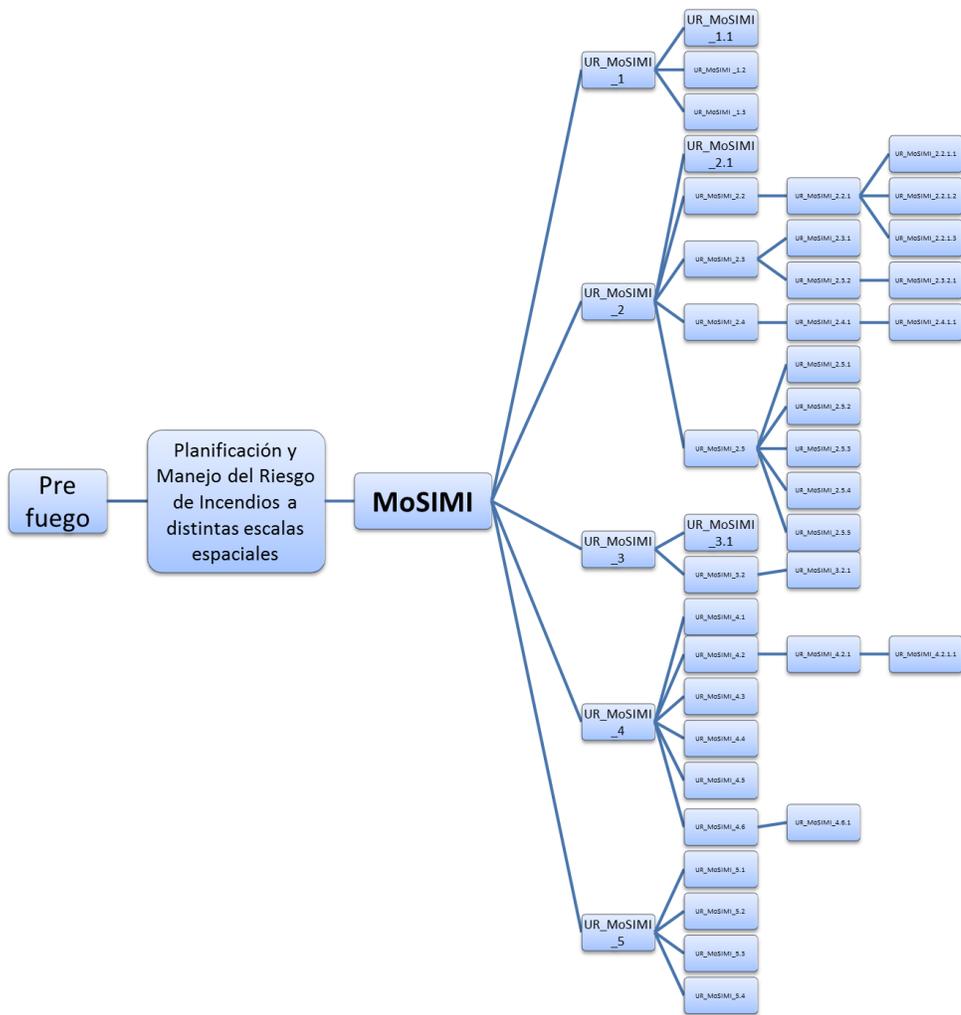


Figura 7: Esquema de la estructura sobre los requerimientos de usuarios correspondiente al módulo MoSIMI.

Los elementos de la estructura anterior se detallan a continuación:

2.5.1. Tabla de requerimientos de orden superior MoSIMI

ID Requerimiento	Descripción	Padre/ Comentario
UR_MoSIMI_1	<p>El sistema debe generar tres niveles de información:</p> <p>1) Simulación de superficie quemada.</p> <p>2) Crecimiento del perímetro quemado en función del tiempo.</p> <p>3) Velocidad de propagación del frente de fuego en función de la energía por unidad de área.</p>	
UR_MoSIMI_1.1	1) Simulación de superficie quemada: Corresponde a un mapa vectorial que resume el avance del incendio simulado de acuerdo a las condiciones de riesgo predominantes.	UR_MoSIMI_1 Simulación de cicatriz quemada.
UR_MoSIMI_1.2	2) Crecimiento del perímetro en función del tiempo: Corresponde a un gráfico que combina el tamaño de la cicatriz quemada (Eje Y) en función del tiempo (Eje X) expresado en horas.	UR_MoSIMI_1 Gráficos.
UR_MoSIMI_1.3	3) Velocidad de propagación del frente de fuego en función de la energía por unidad de área: Corresponde a un gráfico que representa la velocidad de propagación (Eje X) en función a la energía liberada por unidad de área (Kj/m ²) (Eje Y).	UR_MoSIMI_1 Gráficos.
UR_MoSIMI_2	El sistema debe ser flexible para incorporar datos de diversas fuentes y tipos de información.	UR_MoSIMI_1.1.2

UR_MoSIMI_2.1	El sistema debe Incorporar datos en formato Raster	UR_MoSIMI_2 Raster
UR_MoSIMI_2.2	El sistema debe incorporar variables topográficas	UR_MoSIMI_2 Topografía
UR_MoSIMI_2.2.1	El sistema debe utilizar un DEM (<i>Digital Elevation Model</i>) para la caracterización Topográfica: 1) Alturas, 2) Pendientes, 3) Exposición al Sol.	UR_MoSIMI_2.2
UR_MoSIMI_2.2.1.1	1) Las alturas son provistas por el DEM como metros sobre el nivel del mar (msnm).	UR_MoSIMI_2.2.1
UR_MoSIMI_2.2.1.2	2) Las Pendientes son provistas por el DEM expresadas en porcentaje.	UR_MoSIMI_2.2.1
UR_MoSIMI_2.2.1.3	3) La Exposición al Sol es provista por el DEM expresada como la orientación de las laderas de acuerdo a los puntos cardinales.	UR_MoSIMI_2.2.1
UR_MoSIMI_2.3	El sistema debe incorporar variables relativas al tipo combustibles	UR_MoSIMI_2 Modelos de Combustibles
UR_MoSIMI_2.3.1	Los combustibles deben ser caracterizados de acuerdo a su estructura vertical/horizontal, densidad y nivel de cobertura	UR_MoSIMI_2.3 Estructura
UR_MoSIMI_2.3.2	Los combustibles deben además ser caracterizados en vivos (Herbáceos/Leñosos) y muertos (1h, 10hs, 100hs, 1000hs).	UR_MoSIMI_2.3 Fisiología
UR_MoSIMI_2.3.2.1	Los combustibles deben ser caracterizados de acuerdo a su estructura para combustibles vivos, y de acuerdo al tiempo de	UR_MoSIMI_2.3 Combustibles vivos y muertos

	retardo “ <i>Time Lag</i> ” para combustibles muertos.	
UR_MoSIMI_2.4	El sistema debe incorporar variables relacionadas al contenido de humedad de los combustibles	UR_MoSIMI_2.3 Contenido de Humedad
UR_MoSIMI_2.4.1	El contenido de humedad de los combustibles debe poder estimarse por medio de datos de origen satelital	UR_MoSIMI_2.3 Información Satelital
UR_MoSIMI_2.4.1.1	La humedad del combustible debe estimarse en base a índices espectrales ajustados empíricamente, alternativamente a partir de modelos de transferencia radiativa.	UR_MoSIMI_2.4.1 Índices Espectrales
UR_MoSIMI_2.5	El sistema debe poder incorporar datos meteorológicos en tiempo real, histórico, y pronosticados.	Meteorología
UR_MoSIMI_2.5.1	El sistema debe incorporar información sobre intensidad y dirección de vientos.	UR_MoSIMI_2.5 Vientos
UR_MoSIMI_2.5.2	El sistema debe incorporar información sobre cantidad de precipitación expresadas en mm.	UR_MoSIMI_2.5
UR_MoSIMI_2.5.3	El sistema debe poder incorporar información sobre Humedad Relativa del aire expresada en Porcentaje.	UR_MoSIMI_2.5 Humedad
UR_MoSIMI_2.5.4	El sistema debe poder incorporar información de Temperatura de superficie expresada en grados centígrados (C).	UR_MoSIMI_2.5 Temperatura
UR_MoSIMI_2.5.5	La información sobre variables meteorológicas debe ser provista por datos de modelos numéricos	UR_MoSIMI_2.5 Modelos Numéricos

	de predicción meteorológica o estaciones meteorológicas.	
UR_MoSIMI_3	Las tecnologías utilizadas serán elegidas para maximizar su utilidad/utilización	
UR_MoSIMI_3.1	El sistema deberá poder ser gratuito para los usuarios	UR_MoSIMI_3
UR_MoSIMI_3.2	El sistema debe ser diseñado sobre software libre	UR_MoSIMI_3
UR_MoSIMI_3.2.1	El sistema deberá correr sobre el sistema operativo Linux.	UR_MoSIMI_3.2
UR_MoSIMI_4	El sistema debe funcionar en el ámbito del CUSS.	
UR_MoSIMI_4.1	El sistema deberá recibir la información satelital de los sistemas de ingestión de datos de CGSS (CONAE Ground Station System) en un nivel 1B (Calibrados y geo localizados).	UR_MoSIMI_4
UR_MoSIMI_4.2	El sistema además debe poder incorporar información satelital de otras fuentes ajenas a CONAE	UR_MoSIMI_4
UR_MoSIMI_4.2.1	El sistema debe poder conectarse a servidores web que provean información satelital.	UR_MoSIMI_4.2
UR_MoSIMI_4.2.1.1	El sistema debe contar con accesos FTP y otros de alta velocidad de transferencia	UR_MoSIMI_4.2.1
UR_MoSIMI_4.3	El sistema debe generar productos de manera tan automática como sea posible.	UR_MoSIMI_4
UR_MoSIMI_4.4	El sistema estar diseñado bajo estándares y normas de la ESA adoptadas por CONAE.	UR_MoSIMI_4

UR_MoSIMI_4.5	El sistema deberá ser construido como un conjunto de unidades de procesamiento específico.	UR_MoSIMI_4
UR_MoSIMI_4.6	El sistema debe generar productos de manera operativa.	UR_MoSIMI_4
UR_MoSIMI_4.6.1	Los productos MoSIMI deben ser generados a partir de la secuencia de procesos específicos previamente definidos y documentados	UR_MoSIMI_4.5
UR_MoSIMI_5	Los productos MoSIMI deberán estar disponibles vía un servidor cartográfico <i>on line</i> para su accesibilidad continua.	
UR_MoSIMI_5.1	Funcionalidades básicas tales como: Zoom – medición – consultas puntuales-	UR_MoSIMI_5
UR_MoSIMI_5.2	Download – shapes, geotiff, kml y otros formatos SIG.	UR_MoSIMI_5
UR_MoSIMI_5.3	Print – pdf/jpg	UR_MoSIMI_5
UR_MoSIMI_5.4	Quiklooks	UR_MoSIMI_5

Tabla 4: Requerimientos de orden superior MoSIMI

2.6. Identificación de Productos

En base a los requerimientos de los usuarios se procedió a identificar los productos. Cada producto se identificó en forma escalonada partiendo de la necesidad de un usuario específico o un conjunto de ellos. La creación de los módulos previamente establecidos, representa el núcleo operativo de cada producto o un conjunto de ellos. En función de ello, a continuación se presenta una breve definición de los objetivos específicos de cada módulo, y luego se procede con el proceso de identificación de los productos. Se desarrolla una breve descripción de los productos propuestos, para luego describirlos en forma detallada en el capítulo 3.

<p>MoPRI: “Módulo de Peligrosidad y Riesgo de Incendio”</p> <p><i>Objetivos específicos:</i></p> <p>Generar un índice integrado de peligrosidad y riesgo de incendios que permita advertir en forma anticipada, el estado de la vegetación en zonas naturales y plantaciones forestales.</p>
<p>MoDIIA: “Módulo de Detección e Identificación de Incendios Activos”</p> <p><i>Objetivos específicos:</i></p> <p>Detectar y caracterizar eventos de incendio a partir del agrupamiento espacio temporal de focos de calor MODIS.</p>
<p>MoDAQ: “Módulo de Detección de Áreas Quemadas”</p> <p><i>Objetivos específicos:</i></p> <p>Detectar y caracterizar las superficies afectadas por incendios a nivel regional utilizando información satelital de mediana y alta resolución.</p>
<p>MoSIMI: “Módulo de Simulación del comportamiento de Incendios”</p> <p><i>Objetivos específicos:</i></p> <p>Simular el comportamiento de incendios a partir de las condiciones de riesgo del terreno utilizando información satelital y datos meteorológicos.</p>

Tabla 5: : Módulos y sus objetivos específicos.

2.6.1. MoPRI_p1: Índice de Amenaza:

Corresponde a un mapa de tipo raster con resolución de 1km basado en las características de accesibilidad del terreno y la presencia de actividades humanas.

Atributo: El mapa comprende un rango de 0 a 1 que representa el peligro de ignición de un incendio en función a la distancia a vías de comunicación, actividades humanas (Caracterización en función del uso del suelo y la presencia de vías de comunicación, centros turísticos y zonas de interface urbana), ejidos urbanos, poblaciones y ciudades en general. Es un mapa estático.

2.6.2. MoPRI_p2: Índice de Peligrosidad Topográfica

Corresponde a un mapa de tipo raster con resolución 1km basado en las características topográficas extraídas de un DEM, que representan mayor peligro de incendio.

Atributos: El mapa comprende un rango de 0 a 1 que representa el peligro que presentan las características topográficas ante la presencia de un fuego (que influyen su propagación). Específicamente, la combinación de las alturas sobre el nivel del Mar (curvas de nivel), las pendientes, la exposición al sol y la exposición a vientos predominantes. Es un mapa estático.

2.6.3. MoPRI_p3: Índice de Peligrosidad de la Vegetación

Corresponde a un mapa de tipo raster con resolución de 1km que comprende el modelo de combustible correspondiente a cada tipo de cobertura. Se define como modelo de combustible en este trabajo a las definiciones de [29] donde para cada formación de vegetación presente o un conjunto de ellas, se las clasifica como un modelo con características estructurales específicas (Ej: Pastizal, Arbustal, Bosque), las cuales se caracterizan por corresponder a un determinado comportamiento de propagación de fuego. Estos modelos además, se los pretende asociar a una estimación del contenido de humedad del combustible determinado en forma diaria como un indicador del estado de flamabilidad actual. El mapa de combustibles deberá ser producido mediante una clasificación de las coberturas de vegetación (actualizado en forma periódica en un tiempo a definir), y la estimación del contenido de humedad, deberá basarse en información espectral (índices de vegetación a definirse) provista por el sensor MODIS.

Atributos: El mapa comprende un conjunto de categorías o clases que definen a cada uno de los combustibles. Para cada clase se le adjudica un rango de valores de 0 a 1, indicando con valores más altos, mayor contenido hídrico (menor combustibilidad). La actualización del producto es diaria o quincenal (mapa dinámico a definir).

2.6.4. MoPRI_p4: Índice de Peligrosidad Meteorológico

Corresponde a un mapa raster con resolución de 25km resultado del cálculo del índice FWI [51] (Fire Weather Index) a partir de las variables del día: Temperatura, Humedad Relativa, velocidad del viento, y precipitación (24 hs pasadas), estimadas a partir de *Modelos Numéricos de Predicción Meteorológica (MNPM)*.

Atributos: El mapa comprende un rango entre 0 y 1 valores, con mayores valores para las condiciones de peligro meteorológico, con mayor impacto en el riesgo de incendio. El producto debe ser actualizado en forma diaria.

2.6.5. MoPRI_p5: Índice de valoración

Corresponde a un mapa de tipo raster con resolución de 1km que indica la presencia de zonas con mayor valor para su protección contra incendios. Los elementos valorados se basan en atributos socioeconómicos y paisajísticos.

Atributos: El mapa comprende un rango de 0 a 1, indicando con valores más altos, zonas con mayor valor. Se basa en cartografías de cobertura y uso del suelo, accidentes geográficos destacados y elementos del paisaje con alto valor para la conservación. Otras fuentes de origen estadístico pueden servir para los indicadores socioeconómicos (Ej.: turismo, densidad poblacional, etc.)

2.6.6. MoPRI_p6: Índice de Accesibilidad

Corresponde a un mapa de tipo raster con resolución de 1km que indica las posibilidades de acceso de acuerdo a la presencia de vías de comunicación, y las características topográficas existentes.

Atributos: Representa la dificultad de acceder o transitar y tiene un rango que va de 0 a 1. A Mayor valor mayor dificultad. Los valores pueden ser análogos al concepto de superficies de costo, el cual representa para cada pixel, el costo total más bajo de atravesar el terreno entre cada pixel y los puntos de interés especificados por el usuario.

2.6.7. MoPRI_p7: Índice Integrado de Riesgo

Corresponde a un mapa de tipo raster con resolución de 1km. Representa las condiciones de peligrosidad de la vegetación junto a las amenazas relativas al factor humano.

Atributos: Se representa en un rango de valores de 0 a 1. A Mayor índice mayor amenaza de que un incendio ocurra, y mayor el peligro de la vegetación a ser quemada.

Sub-producto: Archivo shapefile con el índice de Peligrosidad y el Riesgo de incendios a nivel mensual. Otros formatos SIG: KML, KMZ, WMS.

2.6.8. MoDAQ_p1: Área Quemada

Corresponde a un mapa de tipo raster binario que comprende las clases quemado y no quemado para el territorio Nacional. Se basa en imágenes de resolución media (500m) provistas por el sensor MODIS.

Atributos: El mapa raster debe tener información sobre la superficie quemada expresada en hectáreas, el perímetro quemado, el tipo de vegetación afectada, y la fecha de inicio del incendio. El tamaño de pixel es de 500m con una frecuencia temporal de actualización mensual.

Sub-productos: Archivo shapefile con el acumulado de áreas quemadas a nivel mensual. Otros formatos SIG: KML, KMZ, WMS. Reportes en formato pdf con contenido de mapas, tablas y estadísticas sobre Áreas quemadas, cuyo contenido es personalizado por el usuario. Cuantificación de Áreas quemadas en ANP's y otras infraestructuras de interés.

2.6.9. MoDIIA_p1: Eventos de Incendio

Corresponde a un mapa de tipo vectorial (Polígonos), que representa la acumulación de eventos de incendios detectados a partir de la agrupación espacial de focos de calor. El producto está pensado para obtener una estimación de la superficie quemada y la forma de un incendio a partir del registro de focos de calor y su intervención por medio de técnicas de análisis espacial.

Atributos: El mapa vectorial debe tener información sobre la identidad de cada evento (ID), la delimitación del perímetro, la superficie aproximada, la localización del centro del polígono (centroide), el número de focos de calor involucrados en el evento, el horario de captura de la imagen inicial y final del evento, las fechas del inicio y fin, el tipo de vegetación afectada, su localización a nivel Departamental, Provincial, y Nacional y la cantidad de energía liberada (Mw) por el fuego. El producto es de actualización mensual.

Sub-producto: Archivo shapefile (puntos) con los clúster de focos de calor a nivel diario. Otros formatos SIG: KML, KMZ, WMS.

2.6.10. MoDIIA_p2: Alertas y resúmenes de eventos de incendio a nivel Nacional.

Corresponde a un informe en formato PDF u otro tipo, que contiene información relativa a la presencia de focos de calor en el territorio Nacional. Las alertas corresponden a las situaciones donde los focos se encuentran dentro o cercanos a los límites de un APN o región forestal de interés. El informe además, puede ser sobre la situación general de incendios a nivel país, y será

confeccionado de acuerdo a los requisitos del usuario. Es distribuido vía correo electrónico o vía SMS y entre otros formatos a investigar.

Atributos: El informe contiene un mapa del ANP o zona forestal afectada por focos de calor, tablas y gráficos del número de focos de calor, e información auxiliar sobre las características de la zona afectada.

2.6.11. MoSiMI_p1: Simulaciones del comportamiento de incendios

Corresponde a un mapa de tipo raster y vectorial (de acuerdo al usuario) que representa la superficie quemada simulada.

Atributos: Las simulaciones deben tener información sobre la superficie quemada y el perímetro alcanzado como función de las condiciones de propagación del terreno.

Sub-productos: Shapes de área quemada. Gráficos sobre: a) Crecimiento del perímetro quemado en función del tiempo y b) Velocidad de propagación del frente de fuego en función de la energía por unidad de área.

Capítulo III

3. Arquitectura y descripción de productos

Así como fue especificado anteriormente, la CONAE adopta los estándares propuestos por la ESA para la producción de software. Por ello que el sistema SARTiv debe cumplir con las fases especificadas por la norma. En el presente capítulo se desarrollan las bases del diseño arquitectónico de SARTiv, contemplando una arquitectura de módulos, que sea versátil y flexible para ser integrada al sistema de CONAE.

3.1. Definición del diseño Arquitectónico, Sistemas, Sub-sistemas y Módulos.

El sistema propuesto debe operar dentro del segmento de servicios al usuario de CONAE (CUSS), el cual posee una infraestructura adaptada a la integración de procesos externos. De este modo, SARTiv está pensado como una infraestructura independiente que se integra a una cadena de procesos existentes dentro del CUSS, el cual forma parte de un sistema complejo de operaciones denominado CONAE Ground Segment (CGS). El sistema entonces, debe operar dentro de los estándares de CONAE, emplear la información procesada en el CGS, y comunicarse con una interface de usuarios (figura 8).

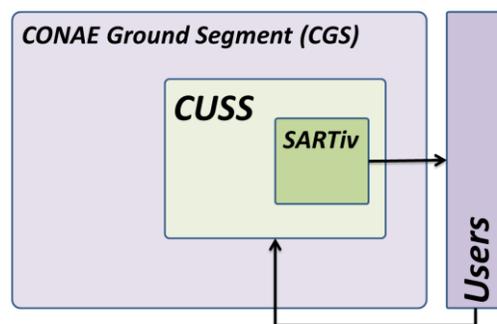


Figura 8: Operación del sistema SARTiv dentro del sistema de CONAE.

Para proporcionar la infraestructura necesaria y gestionar la producción del sistema, se prevé que el entorno de procesamiento cumpla con las siguientes funcionalidades:

- Manejar el procesamiento de pedidos,
- Comprobar, seleccionar y recuperar almacenamiento de todos los datos de entrada necesarios (por ejemplo, productos de entrada y datos auxiliares) de acuerdo con las normas específicas de selección de archivos,
- Revisar y asignar recursos para poner en marcha una solicitud de procesamiento,
- Generar órdenes de trabajo para configurar el procesamiento de acuerdo con el modelo de dependencia configurado,
- Enviar los comandos necesarios para los elementos de procesamiento para controlar el procesamiento,
- Monitorear los elementos de proceso mediante la recopilación de información de estado (por ejemplo, información registrada),
- Recopilar y cargar archivos de salida del elemento de procesamiento para almacenar y / o para difusión.

La configuración del sistema se propone de acuerdo a un esquema distribuido, a partir de diferentes subsistemas y nodos de procesamiento con funciones específicas (Figura 9).

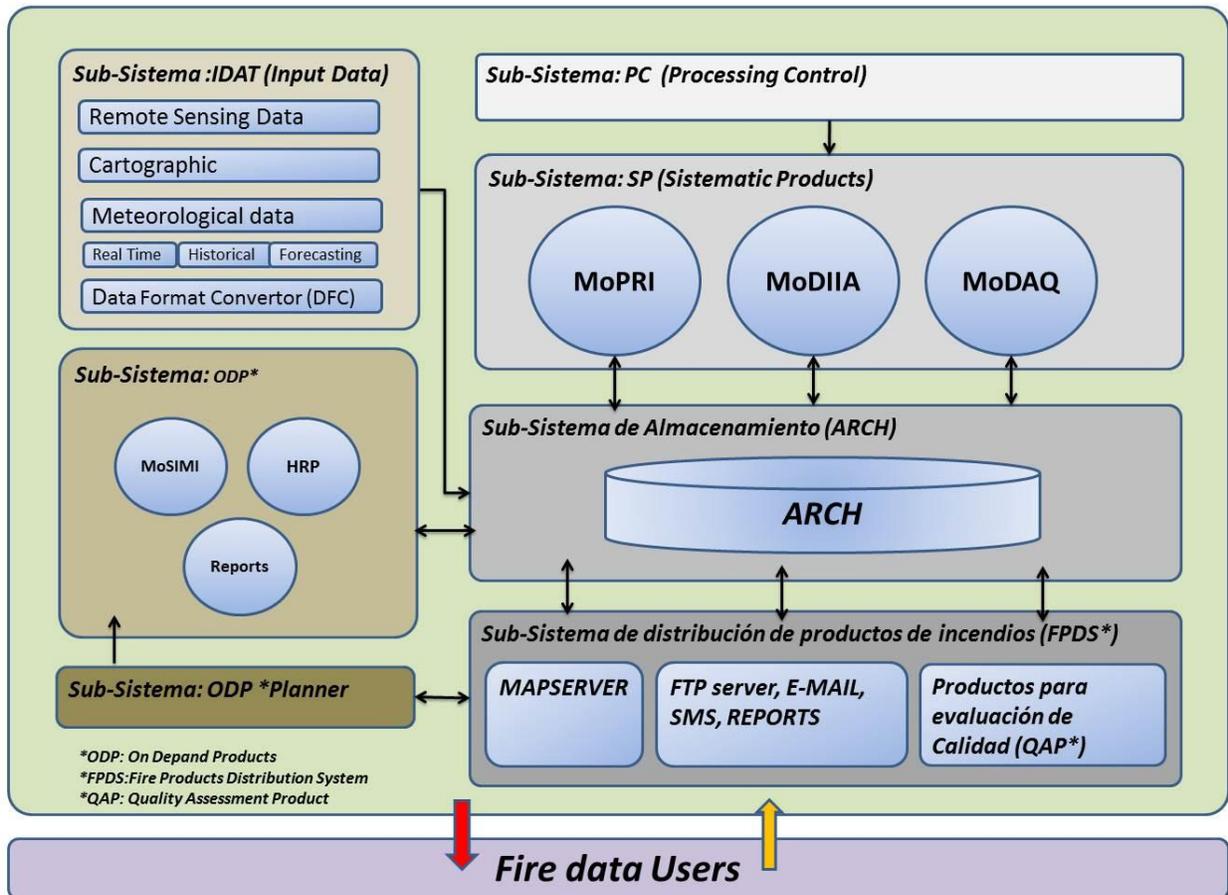


Figura 9: Arquitectura del Sistema SARTiv.

A continuación se presentan los elementos que componen al sistema junto a una descripción de las funcionalidades específicas:

- Processing Control Subsystem (PC): Es el sub sistema responsable de controlar la actividad de los módulos de procesamiento que forman parte del sub sistema SP de productos sistemáticos. Actúa como un controlador que invoca los procesos de rutina, y opera sobre el uso eficiente de procesadores.
- Input Data Subsystem (IDAT): Tiene la función de gestionar los datos de entrada al sistema y asegurar la compatibilidad de los distintos formatos posibles. Se prevé la ingestión de datos de diversas fuentes, para lo cual, deben ingresar a la cadena de procesamiento bajo un mismo tipo de formato (ASD).

- Systematic Products Subsystem (SP): Es el subsistema responsable de ejecutar en forma sistémica (rutinaria) las tareas de procesamiento de los módulos MoPRI, MoDIIA y MoDAQ es controlado por el subsistema PC.
- On Demand Products Subsystem (ODP): Este subsistema es el responsable de ejecutar la demanda de productos solicitados por los usuarios. Opera sobre el Módulo MoSIMI, sobre la demanda de productos de alta resolución (HRP), y ejecuta la demanda de reportes.
- Almacenamiento (ARCH): Corresponde al archivo de almacenamiento que contiene toda la información del sistema, tanto los datos crudos como los productos obtenidos
- On Demand Products Planner (ODPP): Corresponde a un subsistema encargado de planificar la demanda de productos por parte de los usuarios. Interactúa entre el ODP y FPDS. El planificador recibe pedidos por parte del FPDS y ejecuta una serie de prioridades en función del tipo de demanda y las condiciones de procesamiento del sistema en forma global.
- Fire Products Distribution Subsystem (FPDS): Es responsable de asegurar la disponibilidad de los datos a los usuarios. Tiene la función de importar datos, desde o hacia los usuarios. Además, incorpora un Módulo de evaluación de la calidad de los productos (QAP) que busca determinar la confiabilidad de cada producto, y con ello, informar sobre posibles desperfectos.

Los módulos definidos para ejecutar los productos, concentran las funcionalidades requeridas para cumplir con las especificaciones esperadas por los usuarios. Estas funcionalidades han de ser operadas simultáneamente de acuerdo a las necesidades y el tipo de información requerida al sistema en un momento dado. Esto puede significar, que el sistema deba operar empleando sus recursos en forma paralela. Por ello se pensó en distribuir la producción de productos para cada uno de los módulos. Cada módulo puede hacer uso de tantos procesadores como sea necesario, para lograr ejecutar en forma operativa la producción de productos. El uso de los procesadores involucrados en la producción está controlado por el subsistema de control (CP). Este elemento gestiona el nivel de procesamiento de cada módulo con el fin de ganar eficiencia computacional y en el tiempo. A continuación, se presenta para cada módulo, la definición de los productos identificados para satisfacer la demanda de los usuarios.

3.2. MoPRI

3.2.1. Índice de Amenaza (MoPri_p1):

La amenaza es uno de los componentes centrales en el análisis de riesgo. Corresponde a los factores de peligro que representan las actividades humanas y los factores de origen natural. Se la clasifica dentro de las variables causales asociadas a la ignición y propagación del fuego [26].

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución de 1km basado en las características de accesibilidad del terreno y la presencia de actividades humanas.

Atributo: El mapa comprende un rango de valores de 0 a 1 que representa la Amenaza de inicio de incendio en función a la distancia a vías de comunicación, actividades humanas (Caracterización en función de la cercanía a vías de comunicación, centros turísticos y zonas de interface urbana), ejidos urbanos, poblaciones y ciudades en general (Producto estático).

Input:
1) Vías de comunicación (Rutas Nacionales, Provinciales. Caminos, Calles, etc.) 2) Ejidos urbanos (Calles y límites de zonas urbanas) Fuente: Instituto Geográfico Nacional (IGN), Proyecto Mapear.
Formato: Shapefile
Algoritmo: Buffer de distancias.
Output:
1) Índice de Amenaza (Rango 0-1)
Formato: Raster, Resolución 1km, Cobertura: Nacional
Actualización: Estático

Tabla 6: I/O MoPRI_p1

3.2.2. Índice de Amenaza en alta resolución (MoPRI_P1_HR_1_n)

Se basa en el mismo producto, pero con características de alta resolución y sobre zonas específicas de aplicación seleccionado por el usuario o el consorcio de administración de la zona. Conserva las mismas características, cambiando la resolución del output (10m.) y la Cobertura. (Ej.: Parque Nacional Quebrada del Condorito –PNQC-).

3.2.3. Índice de Peligrosidad Topográfica (MoPRI_p2)

El peligro de incendio que deviene de la topografía, corresponde al análisis de como es el comportamiento del fuego sobre diversas configuraciones del terreno. Tales configuraciones, se agrupan en tres grupos: las características de las pendientes, la exposición al sol y la altura del terreno sobre el nivel del mar. Cada variable tiene un efecto particular sobre las condiciones de propagación de un incendio. Para determinar cuantitativamente el efecto de cada una de ellas, se suele cruzar la presencia de incendios, con las variables topográficas, donde se extrae el rango de valores que son impactados por el fuego para cada una de las variables.

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución 1km basado en las características topográficas extraídas de un Modelo Digital de Terreno, que de acuerdo a la incidencia histórica de incendios, representan niveles de peligro de incendio variable.

Atributos: El mapa comprende un rango de 0 a 1 que representa el peligro que presentan las características topográficas ante la presencia de un incendio (que influyen su propagación). Específicamente, la combinación de las alturas sobre el nivel del Mar (Curvas de nivel), las pendientes, la exposición al Sol y la exposición a vientos predominantes (mapa estático).

Input:
1) Modelo Digital de Elevaciones (DEM),1 km. de resolución espacial Fuente: SRTM
2) Focos de calor
Formato: Raster
Algoritmo: Empleo de funciones de análisis espacial presentes en el paquete R: (El algoritmo debería ser ajustado/mejorado a las condiciones de la región).
Output:
1) Mapa de Alturas (m.s.n.m)
2) Mapa de Pendientes (%)
3) Mapa de Exposición al Sol (Puntos Cardinales: N, S,E,O, NE, SE, SO,NO)
4) Mapa de Exposición a vientos predominantes (Puntos Cardinales: N, S ,E ,O ,NE ,SE, SO,NO)
5) Índice de Vulnerabilidad Topográfica (Rango 0-1)
Formato: Raster
Actualización: Estático

Tabla 7: I/O MoPRI_p2

3.2.4. Índice de Peligrosidad Topográfica en alta resolución (MoPRI_p2_HR_n)

Se basa en el mismo producto, pero con características de alta resolución a partir de datos de 30m de resolución (Fuente ASTER-GDEM) y sobre zonas específicas de aplicación, seleccionadas por el usuario o el consorcio de administración de la zona.

Conserva las mismas características, cambiando la resolución del output (10m.) y la Cobertura: (Ej.: Parque Nacional Quebrada del Condorito –PNQC-).

3.2.5. Índice de Peligrosidad de la Vegetación (MoPRI_p3)

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución de 1km que comprende el estado de flamabilidad de la vegetación en función de sus características estructurales y fisiológicas. Específicamente, el índice debe estar compuesto por una cartografía de modelos de combustibles basados en la clasificación del tipo de la vegetación (Mapa de uso y cobertura del suelo) de acuerdo a la clasificación de modelos de [29] o en su defecto a [52].

En cuanto a las características fisiológicas, el producto debe contar con una estimación del estado hídrico de la cobertura, que debe ser relacionado a la flamabilidad de los modelos de combustibles cartografiados. El enfoque que se propone es a partir del trabajo de [53], mediante el índice Equivalent Water Thickness (EWT). El índice se espera que sea calculado mediante información del sensor MODIS.

Atributos: El mapa comprende un rango de 0 a 1, indicando con valores más altos, mayor contenido hídrico de los combustibles. La actualización del producto es diaria y/o quincenal (mapa dinámico).

Input:
1) Imágenes MODIS (500 m.) Bandas de reflectancia 1 a 7. 2) Imágenes MODIS (500 m.) Temperatura. 3) Mapa de Combustibles (500 m.) Fuente: 1 y 2) CUSS, 3) INTA.
Formato: Raster
Algoritmo: El desarrollado por Cecatto 2001,a,b.
Output:
1) Índice de Peligrosidad de la Vegetación (Rango 0-1) 2) Mapa de Modelos de Combustibles (basado en tipos de vegetación)
Formato: Raster
Actualización: Diaria

Tabla 8: I/O MoPRI_p3

3.2.6. Índice de Peligrosidad de la Vegetación en alta resolución (MoPRI_p3_HR_1)

Se basa en el mismo producto, pero con características de alta resolución a partir de datos de 30m de resolución (Fuente SPOT) y sobre zonas específicas de aplicación, seleccionadas por el usuario o el consorcio de administración de la zona.

Conserva las mismas características, cambiando la resolución del output (10m.) y la Cobertura: (Ej.: Parque Nacional Quebrada del Condorito PNQC)

3.2.7. Índice de Peligrosidad Meteorológico (MoPRI_p4)

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución de 25 Km. Basado en información de estaciones meteorológicas o en su defecto a partir de MNPM. El índice que se propone es el FWI desarrollado por [54]. Las Variables empleadas en forma diaria corresponden a la Temperatura, Humedad Relativa, velocidad del viento, y lluvias (24 hs pasadas). Este índice servirá en forma general para estimar las condiciones de riesgo en forma dinámica de acuerdo a las condiciones meteorológicas del día. Es uno de los índices más utilizados a nivel mundial por lo que se cree que su aplicación en Argentina debería ser de gran utilidad.

Input:
1) Imágenes de Temperatura (LST*). 2) Imágenes de Humedad Relativa (LST) 3) Imágenes de precipitaciones (Ultimas 24 hs.) 4) Imágenes de Viento (LST) Fuente: 1 a 4) Estaciones Meteorológicas o Modelos Numéricos de Predicción Meteorológica. (*LST: Local Standard Time (valores al medio día))
1) Algoritmo: (Basado en el Fire Weather Index - FWI) (Van Wagner, 1987)
Formato: Raster, Resolución (25km)
Output:
2) Cartografías diarias de índice de Peligrosidad Meteorológico
Formato: Raster
Actualización: Diaria

Tabla 9: I/O MoPRI_p4

3.2.8. Índice de valoración del paisaje (MoPRI_p5)

La valoración del paisaje corresponde a uno de los elementos que definen a la vulnerabilidad de una región a ser afectada por incendios. Zonas de alto valor para la conservación, son declaradas como prioritarias para proteger contra el daño del fuego. Lo mismo, se concibe de

acuerdo a la idea de vulnerabilidad. Tales zonas presentan mayor vulnerabilidad de acuerdo a sus características ecológicas. Otros elementos de valor que están comprendidos en el análisis de vulnerabilidad, es el valor socioeconómico específico de una región, y su potencial de degradación asociado.

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución de 1km que indica la presencia de zonas con mayor valor para su protección contra incendios.

Atributos: El mapa comprende un rango de valores de 0 a 1, indicando con valores más altos, zonas con mayor valor para su protección. Se basa en cartografías de cobertura y uso del suelo, accidentes geográficos destacados, presencia de ANP's y otros elementos del paisaje con valor para la conservación. Sin perjuicio de esto en cualquier caso el bien máspreciado a proteger es la vida humana. De lo que se desprende que las zonas con valor 1 corresponderán a zonas habitadas.

Input:
<ol style="list-style-type: none"> 1) Mapa de Vegetación (500 m.) 2) Cartografía de ANP's. 3) Cartografía de áreas de interés para la conservación 4) Cartografía de valores culturales 5) Cartografía de zonas pobladas (Pueblos, Ciudades, etc.)
Formato: Shapefiles y Raster
Algoritmo: Zonas urbanas/pobladas: 1, ANP's: 0.5, Forestaciones Comerciales: 0.4, Bosque Nativo: 0.4;
Output:
1) Índice de Valoración (basado en la asignación de valores a las cartografías input)
Formato: Raster
Actualización: Estático (Actualizable cada 5 años)*

Tabla 10: I/O MoPRI_p5

3.2.9. Índice de Accesibilidad (MoPRI_p6)

La Accesibilidad es otro de los elementos que se asume en este trabajo como de gran importancia en la estimación del riesgo de incendio. La accesibilidad puede ser interpretada como la posibilidad de llevar a un lugar con recursos para el ataque, o bien como la dificultad de acceder por limitaciones físicas. La accesibilidad de acuerdo a la propuesta de sete trabajo, está dentro de los componentes que definen el nivel de amenaza de una región. Por ello queda enmarcado como un elemento prioritario dentro del cálculo de amenaza.

Un concepto a tener en cuenta, en relación a la accesibilidad es el de superficies de costo, el cual representa para cada pixel de una imagen la dificultad que presenta atravesar de un punto a otro. En una escala de 0 a 1, los valores más bajos representan el menor costo de acceso, lo cual estaría indicando mayores posibilidades de acceso.

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución de 1km que indica las posibilidades de acceso de acuerdo a la presencia de vías de comunicación, y las características topográficas existentes.

Atributos: Representa la dificultad de acceder o transitar en un rango de 0 a 1. Mayor el valor, mayor dificultad de acceso

Input:
<ol style="list-style-type: none"> 1) Vías de comunicación (Rutas Nacionales, Provinciales. Caminos, Calles, etc.) 2) Mapa de Pendientes (%) 3) Sitios con disponibilidad de Recursos para el Control de Incendios (ej.: Cuarteles de Bomberos, Disponibilidad de Abastecimiento de Agua) <p>Fuente: 1) IGN, Proyecto Mapear, 2) Aster GDEM.</p>
Algoritmo: ASD
Formato: Shapefiles y Raster
Output:
<ol style="list-style-type: none"> 1) Índice de Accesibilidad (basado en la presencia y tipo de vías de comunicación y su configuración en el terreno, características topográficas.)
Formato: Raster
Actualización: Estático (Actualizable cada 5 años)

Tabla 11: I/O MoPRI_p6

3.2.10. Índice Integrado de Peligrosidad y Riesgo (MoPRI_p7)

El producto tiene el objetivo de concentrar mediante un único indicador, la contribución de los factores que componen al riesgo (Amenaza y Vulnerabilidad). La Amenaza resume los factores del peligro de ignición, y la vulnerabilidad resume los factores relativos a los valores de los recursos potencialmente afectados/dañados. El peligro de ignición, o dicho de otro modo, la probabilidad de ignición, está dada por la accesibilidad y la probabilidad de rayos, y además por las condiciones de la vegetación. Además, la amenaza puede incluir algún indicador del peligro de propagación de la superficie. Es decir, que el componente de amenaza deberá contener estos elementos en forma integrada (índice de accesibilidad, índice de peligrosidad de la vegetación, y el índice de propagación). Del lado de la vulnerabilidad, debe considerar un estudio de valoración del paisaje, puntualmente sobre los valores de conservación y fundamentalmente el valor asignado a zonas habitadas.

Características: Corresponde a un mapa raster con resolución de 1km con cobertura a nivel nacional. Representa las condiciones del territorio que presentan diferentes niveles de amenaza mediante la representación del peligro de ignición calculado de acuerdo a la accesibilidad, y a partir de las condiciones del estado de la vegetación. Además, debe incorporar las estimaciones de vulnerabilidad calculadas a partir de la valoración de los elementos del paisaje.

Atributos: Representa conjuntamente en un rango de 0 a 1 la Peligrosidad y el Riesgo de incendios. Mayor el índice, mayor es la amenaza de que un incendio ocurra (Factor de ignición), y en forma recíproca, mayor el peligro de la vegetación a ser quemada (Factor de Propagación).

Formatos: Archivo shapefile con el índice de Peligrosidad y el Riesgo de incendios a nivel mensual. Otros formatos SIG: KML, KMZ, WMS.

Input:
1) Índice de Amenaza (Rango 0-1) 2) Índice de Vulnerabilidad (Rango 0-1)
Formato: Shapefiles y Raster
Algoritmo: $Riesgo = A \times V$ Dónde: A= Índice de Amenaza; V= Índice de Vulnerabilidad $A = \sum Ci \times Ki_A$ $V = \sum Ci \times Ki_v$ Ci = Correlación de eventos de incendio con Ki Ki = Índices intermedios (Ej.: índice de peligrosidad topográfica, índice de Peligrosidad de la vegetación.)
Output:
1) Índice integrado de Peligrosidad y Riesgo (Rango 0 -1).
Formato: Raster
Actualización: Diario.

Tabla 12: I/O MoPRI_p7

3.2.11. Índice Integrado de Peligrosidad y Riesgo en alta resolución (MoPRI_p7_HR_1)

Se basa en el mismo producto, pero con características de alta resolución a partir de datos de 30m de resolución (Fuente SPOT) y sobre zonas específicas de aplicación, seleccionadas por el usuario o el consorcio de administración de la zona.

Conserva las mismas características, cambiando la resolución del output (10m.) y la Cobertura: (Ej.: Parque Nacional Quebrada del Condorito -PNQC)

3.2.12. Índice de Peligro de Propagación (MoPRI_p8)

El peligro de propagación se basa a partir del producto MoPRI_p1 (índice de amenaza), y el producto MoPRI_p3 (índice de Peligrosidad de la vegetación). Considera el peligro de ignición asociado a la cercanía de actividades humanas, y las condiciones de los combustibles, lo cual determina la posibilidad de que un frente de incendio arribe a determinado lugar.

Características: Se calcula mediante la aplicación de un simulador de incendios, que se ejecuta a partir de un número de igniciones determinadas, que se localizan en el espacio de acuerdo a la amenaza del territorio. El simulador debe operar de acuerdo a la bondad de los combustibles, es decir, que la dirección de propagación será en función de la disponibilidad y el nivel de combustibilidad de los modelos de combustibles.

Atributos: El índice se representa en un rango de valores entre 0 y 1. Cada celda constituye el valor de la frecuencia que ha sido afectada por un incendio simulado. A mayor frecuencia de quemado, mayor es el índice de Peligro de propagación. Por el contrario, para zonas del territorio poco afectadas, o sea con una baja frecuencia de quemado, se consideran como de bajo peligro de propagación.

Formatos: Archivo de tipo raster con el índice de Peligro de propagación

Input:
3) Índice de Amenaza (Rango 0-1) 4) Índice de Peligrosidad de la Vegetación(Rango 0-1)
Formato: Raster
Algoritmo: $Riesgode Pr = p(N(A.,V),1/N)$ Dónde: A= Índice de Amenaza; y V= Vulnerabilidad.
Output:
2) Índice de Peligro de propagación.
Formato: Raster
Actualización: Diario.

Tabla 13: I/O MoPRI_p8

3.3. MoDAQ

3.3.1. Cartografía de Áreas Quemadas (MoDAQ_p1)

El producto se propone en base a los desarrollos metodológicos de [55] y [17]. Se pretende una aplicación automática basada en imágenes MODIS para todo el territorio nacional. El producto debe ser actualizado en forma mensual. La detección de áreas quemadas se basará en el cálculo de índices de área quemada u otros indicados en la bibliografía especializada. Se pretende que el producto siga los lineamientos de los autores arriba mencionados, con los ajustes pertinentes a las condiciones locales. Como parte del proceso de detección, se recomienda que se empleen datos de focos de calor. Esto, como un dato auxiliar que permita ajustar los valores umbrales de los índices espectrales.

Características: Corresponde a un mapa Vectorial que comprende las clases quemado/no quemado para el territorio nacional en base a imágenes de resolución media (500m) a nivel mensual.

Atributos: Cada polígono correspondiente a un área quemada debe tener información sobre la superficie quemada (Ha.), el perímetro quemado, el tipo de vegetación afectada, y la fecha de inicio del incendio. (La presión de la geo localización del producto deberá ser menor a un pixel MODIS)

Sub-productos: Archivo shapefile con el acumulado de áreas quemadas a nivel mensual. Otros formatos SIG: KML, KMZ, WMS.

Input:
1) Imágenes MODIS (500m) Bandas 1 a 7. 2) Focos de calor MODIS (1km) 3) Mapa de vegetación 4) Mapa de Ecoregiones
Formato: Shapefiles y Raster
Algoritmo: En base a Chuvieco et al, 2008.
Output:
1) Mapa de Áreas quemadas. Valores 0/1.
Formato: Raster y Shapefiles
Actualización: Diario.

Tabla 14: I/O MoDAQ_p1

3.3.2. Área Quemada en alta resolución (MoDAQ_p2)

Producto de alta resolución. A pedido por el usuario mediante la personalización correspondiente a: Zona de interés, y periodo. La selección de los atributos puede ser en base a un mapa interactivo, donde se presenta el territorio nacional, junto a un mapa de vegetación, y las divisiones administrativas correspondientes. El usuario podrá tener a su disposición, los focos de calor del periodo de interés, para ayudarse a identificar la zona donde debe personalizar su reporte. La selección podrá ser a partir de un polígono, el cual será grabado en un formato útil para ser guardado como referencia espacial.

3.3.3. Reportes de Áreas Quemadas a nivel Nacional (MoDAQ_p3)

Se propone un sistema automático de reportes de áreas quemadas para todo el País. La frecuencia de entrega como la zona de interés será flexible de acuerdo a los requerimientos específicos de los usuarios. El formato del reporte también deberá ser variable de acuerdo a las especificaciones de los usuarios. Los reportes serán actualizados en forma automática, y las vías de entrega deberán ser óptimas, contemplando la rapidez y operatividad necesaria. Por ejemplo, el reporte podrá ser sobre un área específica elegida, y para temporadas determinadas. El reporte podrá tener informes de situación y además podrá ser vinculado a otros reportes con otros tipos de información relevante.

3.4. MoDIIA

3.4.1. Focos de Calor (MoDIIA_p1)

El producto de focos de calor que se propone corresponde al producto de focos MODIS en su versión C5, el cual corresponde al algoritmo MOD14 en su versión actualizada. Los datos de focos deberán estar disponibles en un geoportal para ser accesibles por los usuarios de acuerdo a periodos de tiempo y zonas ajustadas a sus requerimientos. Los datos deberán estar disponibles en un archivo histórico, con la posibilidad de disponer de toda la base de datos. Los focos de calor, además, deberán estar disponibles en formatos SIG, y con cartografías disponibles del momento de quema, por ejemplo las mismas imágenes empleadas para la detección de focos, en la cual pueda observarse las plumas de humo producidas.

3.4.2. Eventos de Incendios (MoDIIA_p2)

La detección de eventos de incendios a partir de focos de calor es una alternativa que se aproxima de forma más precisa a la obtención de las características espaciales de los incendios de vegetación. Un evento, se considera, como al conjunto de observaciones de focos de calor continuas en el tiempo y en el espacio que caracterizan a un incendio de acuerdo a su forma y tamaño. Las técnicas más utilizadas dedicadas al monitoreo de incendios por medio de información satelital, se basan en la detección de frentes de incendios activos, cuya posición es registrada mediante un par de coordenadas geográficas x , y . Cada coordenada, representa el centro del pixel detectado con presencia de fuego. Esta aproximación por si misma no representa la superficie ni la forma del incendio, lo que significa un limitante para la correcta interpretación del fenómeno. Por ello que el concepto de eventos de incendio, a partir de técnicas de análisis espacial, busca sortear tales limitaciones.

Características:

El producto se obtiene a partir de datos de focos de calor acumulados en forma diaria para periodos mensuales. La salida es un shapefile de poligonos mensual. Cada evento de incendio está representado por una estructura poligonal, cuyo contorno es obtenido mediante un algoritmo secuencial que aplica técnicas de análisis espacial de puntos.

Atributo:

Corresponde a un mapa vectorial (poligonos) que comprende la agrupación de focos de calor que representan a un evento de incendio. El producto está pensado en base a la acumulación de focos de calor MODIS en forma diaria para el territorio Nacional.

Atributos: El polígono debe tener información sobre la localización de su centro, el número de focos de calor involucrados en el evento, las fechas del inicio y fin, el tipo de vegetación afectada, su localización a nivel Departamental, Provincial, y Nacional, la cantidad de energía liberada (Mw) por el fuego, y si afecta o no afecta un ANP. El producto es de actualización mensual.

Sub-producto: Archivo Shapefile (puntos) a nivel diario. Otros formatos SIG: KML, KMZ, WMS.

Input:
<ol style="list-style-type: none"> 1) Focos de calor MODIS (1km) 2) Mapa de vegetación 3) Mapa de Ecoregiones 4) Limites Administrativos (Nacional, Provincial, Departamental) 5) Mapa de ANP's
Formato: Shapefiles
Algoritmo: en base a: Simon Bayers and Adrian E. Raftery (1998), R. J. Renka (1996), Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D.G. and Seidel, R. (1983).
Output:
1) Shapefile de Eventos de incendio.
Formato: Shapefiles (Poligonos). Tabla de Atributos: ID, Tipo, Fecha inicial, Fecha final, Duración. Numero de focos, Tipo de vegetación (TV).
Actualización: Mensual

Tabla 15: I/O MoDIIA_p2

3.4.3. Alertas y resúmenes de eventos de incendios a nivel Nacional (MoDIIA_p3)

Características: Corresponde a un informe en formato PDF u otro que contiene información relativa a la presencia de Eventos de incendio en base a la detección de focos de calor en el territorio Nacional. Las Alertas corresponden a las situaciones donde se detectan Eventos de incendios dentro o cercano a los límites de un APN o región Forestal de interés. El informe además, puede incluir información sobre la situación general de Eventos de incendios a nivel país, y será configurado de acuerdo a los requisitos del usuario. Es distribuido vía correo electrónico o vía SMS y entre otros formatos a investigar.

La información a configurar por el usuario, comprende la posibilidad de elegir el área de interés, la frecuencia, y variables a elegir.

Atributos: El informe contiene un mapa del ANP o zona forestal afectada por Eventos de Incendio, tablas y gráficos del número de Eventos de Incendio, e información auxiliar sobre las características de la zona afectada.

3.5. MoSIMI

3.5.1. Simulador interactivo del comportamiento de incendios (MoSiMI_p1)

El producto consiste en una herramienta para la simulación del comportamiento de incendios. Se pretende que sea un software de alta operatividad con el usuario, de fácil implementación y altamente interactivo. Se propone como un núcleo de cálculo que corre en un servidor centralizado, a partir del cual el usuario se comunica mediante una interface web en forma interactiva. El usuario, con un mínimo de especificaciones, deberá poder ejecutar una o más simulaciones de incendios en forma paralela para una zona de trabajo determinada. Todos los datos de entrada necesarios deberán estar alojados en el servidor en forma centralizada. Los parámetros de la simulación deberán ser cargados por el usuarios vía web. Por ejemplo, un usuario puede seleccionar una zona de trabajo a partir de un mapa, configurar los elementos del paisaje como la topografía y modelos de combustibles, y ajustar las condiciones de humedad, viento y entre otros factores. Una vez configuradas todos los parámetros necesarios, el usuario podrá ejecutar la simulación y esperar el resultado en pantalla y además solicitar para bajar los archivos de salida.

Características: El producto de salida corresponde a una cartografía de formato vectorial que representa la superficie quemada simulada de acuerdo a los parámetros especificados por el usuario.

Atributos: La cartografía de tipo vectorial debe tener información relativa a: la superficie quemada como función de la simulación de las condiciones ambientales y del territorio predominante.

Sub-productos: Gráficos sobre: a) Crecimiento del perímetro quemado en función del tiempo y b) Velocidad de propagación del frente de fuego en función de la energía por unidad de área.

Capítulo IV

4. Desarrollo y Diseño de Productos

MÓDULO de detección e identificación de fuegos Activos (MoDIIA)

Producto: Eventos de Incendio (MoDIIA_p2)

4.1. Resumen

En este capítulo se presenta una metodología orientada a desarrollar un producto de eventos de incendio basado en la detección de focos de calor y análisis estadístico espacial. El desarrollo de este producto, se basa en las definiciones establecidas dentro del módulo MoDIIA, junto a las especificaciones provistas por los requerimientos de los usuarios. El objetivo del módulo fue orientado a la detección e identificación de eventos de incendio, para lo cual se identificó un producto específico ([ver MoDIIA p2](#)). El término eventos de incendio se considera para el presente trabajo, como el conjunto de focos de calor que presenta una mayor densidad, determinada por una asociación espacio temporal. Los focos de calor son anomalías térmicas de la superficie distribuidas en el espacio, cuya disposición está sujeta a errores espaciales, (falsos positivo y/o falsos negativo) [56]. La localización de focos aislados, se considera que no provee suficiente información para caracterizar un evento de incendio. Se torna así necesario un análisis estadístico espacial que permita filtrar solo los focos con más evidencia de pertenecer a un evento real. Por evento real entendemos a la construcción de una superficie mediante operaciones de geométrica computacional. Como parte del proceso llevado adelante en este capítulo, se realizó un análisis cuantitativo del desempeño de la propuesta usando datos simulados en una buena variedad de situaciones controladas. Finalmente, los resultados se validaron con imágenes satelitales de alta resolución espacial, sobre incendios reales de diferentes magnitudes y formas y para diversas regiones del país. El desarrollo se realizó para un área de estudio que abarca la superficie de la Argentina y países limítrofes. El proceso de cómputo ideado, fue diseñado completamente en un ambiente de código abierto, mediante el software R, GRASS y QGIS.

Los resultados obtenidos en este capítulo, y de acuerdo al cumplimiento de gran parte de los requerimientos establecidos por los usuarios, hacen de esta propuesta, una oportunidad de desarrollo operacional de asimilación directa por usuarios de distintas disciplinas.

4.2. Introducción

En Argentina, junto a los países limítrofes de América del Sur, el fuego es utilizado ampliamente como una herramienta de uso productivo, especialmente en el ámbito de la producción agrícola-ganadera y la producción forestal [41], [57]. El gran avance de la frontera agrícola registrado en los últimos años [58], fundamentalmente asociado a la expansión de cultivos industriales, a derivado en una importante incidencia de incendios vinculados a las actividades de deforestación [59], [60] y ampliación de tierras productivas, lo cual ha desencadenado diversos procesos de degradación de los ecosistemas naturales, pérdida de biodiversidad y alteraciones a nivel hidrológico y climático. De la mano de procesos antrópicos, otro elemento con una gran incidencia sobre la ocurrencia de incendios es el efecto del crecimiento urbano hacia zonas naturales, donde la quema de tierras habilita la expansión de emprendimientos inmobiliarios. En general, dichas actividades son englobadas dentro del concepto de “Cambios en el uso del suelo”, que implica utilizar al fuego como un elemento de uso práctico y de bajo costo, a los fines de establecer nuevas actividades económicas. Sin embargo, dejando los procesos antrópicos de lado, los incendios de origen natural inducen procesos regulatorios sobre los ecosistemas, modelando la presencia y/o ausencia de determinadas especies y su distribución sobre la cobertura terrestre [61].

Uno de los aspectos relacionados a la gestión de incendios, que ha sido obviado dentro de los planes provinciales o nacionales dedicados a la prevención y manejo de incendios, es el desarrollo de un sistema de seguimiento y detección sistemático de eventos de incendios a nivel regional. En Argentina, la falta de un sistema que permita registrar y caracterizar en forma automática la ocurrencia de eventos de incendios, dificulta la posibilidad de contar con un registro unificado, poder evaluar la magnitud de los daños medioambientales, como también planificar las acciones necesarias que involucra la remediación de sitios quemados y el análisis de pérdidas económicas.

Contar con un sistema operativo de detección de eventos de incendios permitiría obtener una caracterización rápida y efectiva de la ocurrencia de eventos, dentro de los tiempos necesarios para la toma de decisiones, lo cual conduciría a su vez obtener un conocimiento más acertado sobre las características del fenómeno. Actualmente, el avance de las tecnologías de observación de la tierra, junto al desarrollo de sistemas de código abierto y a las tecnologías de comunicación, han permitido lograr diversas aplicaciones de gran utilidad en el ámbito de la gestión de incendios. En este contexto, la Teledetección se presenta como una herramienta de gran utilidad para cubrir grandes extensiones con una alta frecuencia temporal, idealmente apropiada para el seguimiento de fenómenos dinámicos como el caso de los incendios de vegetación.

Es común que las técnicas de detección, seguimiento y la cuantificación de la ocurrencia de eventos de incendios sea abordado principalmente por medios aéreos, observación directa o bien por medio de información satelital [62]. La observación directa, y la consecuente elaboración de bases de datos y estadísticas regionales, son de gran utilidad, pero presentan la

limitante relacionada al costo económico, y el tiempo de elaboración, como también, las inconsistencias metodológicas abordadas entre las distintas jurisdicciones involucradas [17]. Los trabajos realizados por medios aéreos, suelen estar acompañados por relevamientos con GPS de las áreas afectadas. Este tipo de trabajos, no solo implica un costo elevado desde el punto de vista técnico para las agencias o bomberos responsables, sino también, costos relativos a recursos humanos no calificados. Además considerando la realidad que no todas las jurisdicciones nacionales cuentan con recursos necesarios para llevar adelante este tipo de relevamientos.

Las implicaciones sociales involucradas como la calidad del aire, las estrategias de manejo forestal y los daños potenciales al hábitat e infraestructuras, son también una preocupación creciente a nivel local y nacional. Por ello, se considera que el monitoreo espacio-temporal de incendios es de suma importancia [63].

Las técnicas desarrolladas por medio de información satelital, han sido principalmente abordadas mediante el uso de información espectral dentro del dominio térmico T (3.5-20), Infrarrojo medio IRm (1.5-5.8), infrarrojo cercano IRc (0.76-1.5), infrarrojo de onda corta SWIR (1.5-2.5) y el espectro visible (0.4-0.7). Las aplicaciones que utilizan datos térmicos, forman parte de las denominadas técnicas de detección de anomalías térmicas, o más conocidos como Focos de calor o Fuegos Activos [16], [39], [56], [64], [65]. Tales aplicaciones han sido pensadas para el seguimiento y la detección de frentes activos de incendios al momento que la combustión de la biomasa vegetal está aconteciendo, aprovechando la fuerte emisión de energía desprendida por las llamas [66]. Los productos de focos de calor desarrollados son utilizados globalmente y cuentan con un alto nivel de validación para distintas regiones del mundo [67–75]

Ejemplos que abarcan varios años de datos de focos de calor incluyen el producto nocturno Along-Track Scanning Radiometer (ATSR), [72], el producto de fuego mensual con el escáner visible e infrarrojo (VIRS)[76], el producto global de incendios MODIS [56], y el producto de fuego del Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES) con su algoritmo Wildfire Automated Biomass Burning (WF ABBA) [77] .

Aparte, el uso del espectro que comprende al IRc, el SWIR y el Rojo ha sido aprovechado para la detección de áreas quemadas, mediante la identificación de los daños estructurales y la pérdida de contenido hídrico de la vegetación.

La propuesta que se presenta en este trabajo, es evaluar técnicas de análisis espacial de puntos mediante el uso de focos de calor con el objetivo de identificar eventos de incendios en forma automática y buscando la mayor precisión posible. Se ha aplicado una metodología de 4 fases principales. 1) En la primera fase se aplica un algoritmo de discriminación, en la cual se identifican dos tipos de patrones: Agrupaciones de focos de calor cuyas características espaciales representan aglomeraciones o clústeres, y focos aislados, que se caracterizan por tener una distribución aislada o independiente. Las aglomeraciones de focos tienen una alta probabilidad de corresponder a eventos de incendios, mientras que la identificación de focos

aislados, corresponden a quemas pequeñas ó falsas alarmas, u otro tipo de fenómenos que irradian altas temperaturas que se suelen confundir con fuegos. 2) En la segunda fase, a partir de los focos identificados como clústeres, se ejecuta un algoritmo de triangulación de nodos en base a la técnica de Delaunay, que nos permite construir las conexiones existentes entre los focos de calor correspondientes a un evento de incendio. 3) En la tercera fase, se aplica un algoritmo que identifica los bordes externos del resultado de la triangulación anterior, con el objetivo de obtener el perímetro final del evento de incendio identificado. 4) Y la última fase, corresponde a la caracterización del evento, en cuanto a la estimación de la superficie quemada aproximada, cuantificar el número de focos detectados como parte de cada evento y determinar su tiempo de duración. Aproximaciones similares a las presente propuesta no son comunes dentro del levantamiento bibliográfico desarrollado para este trabajo, aun así, si existen trabajos publicados que persiguen el objetivo de identificar clústeres de focos, por ejemplo, con el propósito de reconstruir la propagación de eventos de incendios [42], estimar la superficie quemada [78] y entre otros estudios regionales [79]. No obstante, tampoco se han registrado ejemplos operativos que podamos tener como referencia.

En este trabajo se ha propuesto obtener un algoritmo semi-operacional para la generación de eventos de incendios basados en focos de calor que sea aplicable a todo el territorio nacional y a sus países vecinos. Para poner a prueba el algoritmo, se hizo un análisis cuantitativo de su desempeño usando datos simulados en una buena variedad de situaciones controladas. Los resultados obtenidos han sido validados mediante la comparación con áreas quemadas obtenidas a partir del procesamiento de imágenes Landsat TM y CBERS con fechas post-fuego próximas a la ocurrencia del evento.

4.3. Introducción al manejo de datos espaciales en R aplicado a incendios forestales

Uno de los requerimientos del Módulo MoDIIA es que los productos sean diseñados sobre software de código abierto o como su sigla en inglés los define: OSS “Open Source Software”. Por definición, el software libre está disponible para usarlo, estudiarlo, reusarlo, modificarlo, mejorarlo y redistribuirlo por los usuarios, lo cual promueve un campo de colaboración entre desarrolladores y usuarios de gran utilidad para lograr soluciones confiables y de alta probabilidad de éxito. Con la idea de adoptar OSS, una de las alternativas más viables para el presente trabajo, fue la de utilizar el software R (<http://www.r-project.org/>), ya que cuenta con un importante número de paquetes orientados al análisis espacial de datos, además de todas las facilidades de cálculo y almacenamiento, visualización grafica e interfaces hacia otros lenguajes de programación.

4.3.1. Nociones básicas del lenguaje de implementación

R es un lenguaje “orientado a objetos” y se define como un “ambiente” de cómputo estadístico con facilidades gráficas. Cada objeto en R es identificado por pertenecer a un tipo o clase determinada dependiendo de su estructura. El término ambiente intenta caracterizarlo como un sistema completamente planeado y coherente, en lugar de ser un agregado de herramientas específicas sucede con otros programas de análisis de datos [80]. Para un entendimiento desde el punto de vista práctico de las funcionalidades de R, se recomienda leer el libro de Paul Teetor [81], donde se puede acceder a diversos ejemplos aplicados.

De forma general, todas las funciones y datos en R están almacenados en paquetes, pensado originalmente como una alternativa de eficiencia computacional [82]. Existen paquetes de base que forman parte del código, y existen otros paquetes que forman parte de las contribuciones de los desarrolladores. En la tabla 16 se presentan los paquetes empleados para el desarrollo del presente trabajo.

Correspondiente al campo de análisis y manejo de datos espaciales, se han desarrollado diversos paquetes que tienen distintas definiciones de clases de datos, lo cual en un principio ha dificultado el intercambio de información entre paquetes dentro de R, entre R y formatos de archivos y aplicaciones externas [83]. A medida que la demanda de aplicaciones para el análisis y manejo espacial de datos fue creciendo, fue necesario desarrollar clases comunes que faciliten la representación de objetos espaciales en R, y además permitan compartir métodos y conversiones [80]. Uno de los paquetes centrales desarrollados para tales fines, es el paquete “sp” [83]. A partir de este paquete se han desarrollado un importante número de dependencias (paquetes que dependen de sp), todos orientados a la manipulación estandarizada de objetos espaciales. Un ejemplo de ello, es el paquete mapproj que depende de sp, y que permite importar y exportar datos desde y hacia formatos SIG externos (Figura 12). Las clases espaciales disponibles por sp y para el resto de sus dependencias junto a sus atributos se presentan en la tabla 16.

Paquetes	Titulo
Sp	Clases y métodos para datos espaciales
Mapproj	Herramientas para lectura y manejo de objetos espaciales
Shapefiles	Manejo de shapefiles en el paquete spatstat
Rgdal	Bindings for the Geospatial Data Abstraction
Spatstat	Análisis de patrón espacial de puntos, ajuste de modelos, simulación, tests
Graphics	El paquete de Gráficos de R
Alphahull	Generalización del casco convexo de una muestra de puntos en el plano
spgrass6	Interface entre el sistema de información geográfica GRASS 6+ y R

Tabla 166: Paquetes de R utilizados en el algoritmo de detección de eventos de incendio

La clase “Spatial” corresponde a la clase fundamental del paquete sp. De esta clase se desprenden todo el resto de las clases. Contiene únicamente dos componentes de información: 1) Una ventana con la información de las coordenadas espaciales del objeto (bbox), y 2) un componente que define el sistema de proyección (proj4string) (Figura 10).

La clase más básica es aquella que representa a un punto (SpatialPoint). Un objeto de clase SpatialPoint puede estar definido por un único par de coordenadas o un conjunto de ellas. Los puntos pueden tener asociados atributos para crear un objeto SpatialPointsDataFrame (Figura 10).

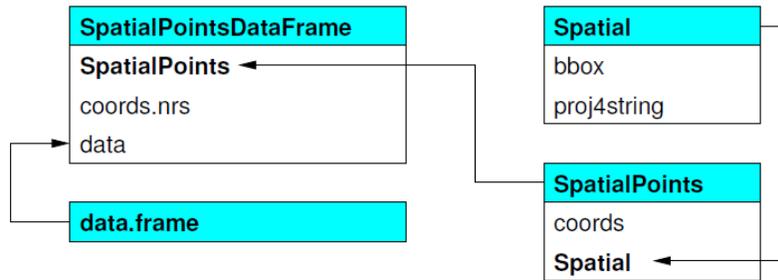


Figura 10: Clases espaciales de Puntos, y sus componentes (slots).

La representación de una línea (Line object) corresponde a una colección de coordenadas en 2 dimensiones. Un polígono es un objeto Line que tiene la primera y última coordenada coincidente (ringDir coords). Un objeto Lines es una lista de objetos Line, al igual que para un objeto Polygons. Los objetos SpatialLines y SpatialPolygons se construyen como una lista de Lines o Polygons respectivamente. Los objetos SpatialLinesDataFrame y SpatialPolygonsDataFrame se definen utilizando objetos SpatialLines y SpatialPolygons junto a dataframes estándares (Figura 11).

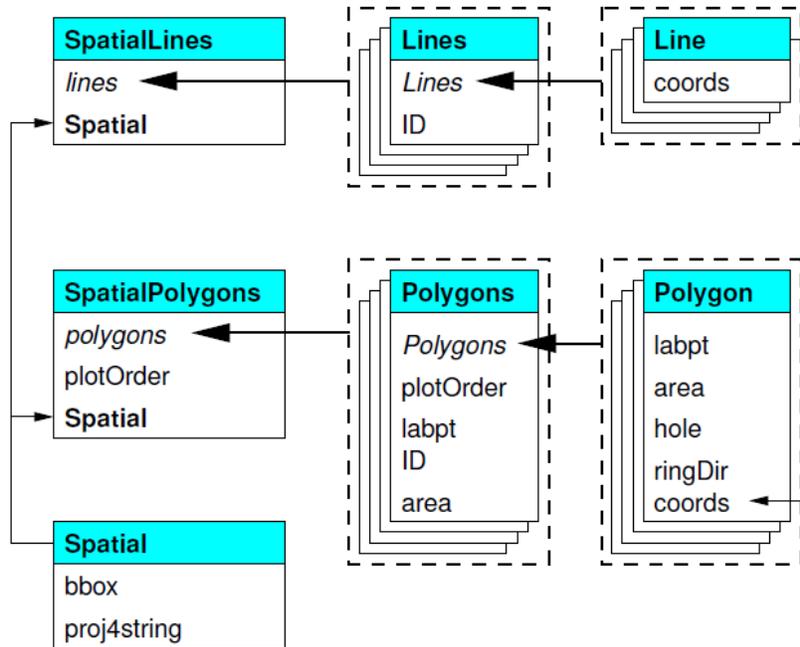


Figura 11: Clases espaciales de Líneas y Polígonos, junto a sus respectivos componentes (slots).

La representación de objetos comunes estuvo pensada para facilitar el trabajo conjunto de quienes trabajan con SIG y los análisis estadísticos, de tal forma que pudieran realizar el manejo y análisis de los datos de una manera inter-operable. Todo ello llevó a que R sea un ambiente de análisis interconectado con programas de SIG. De modo tal que, R puede ser ejecutado dentro de un programa de SIG (ej. QGIS, RSAGA, GRASS), o desde una consola de R se pueden ejecutar funciones de SIG. De este modo, en función de las utilidades necesarias, R provee diversos paquetes contribuidos que permiten desarrollar una importante cantidad de aplicaciones.

tipo de dato	Clase	Atributos	Contiene
Puntos	Spatial Points	No	Spatial
Puntos	SpatialPointsDataFrame	data.frame	SpatialPoints
Pixels	SpatialPixels	No	SpatialPoints
Pixels	SpatialPixelsDataFrame	data.frame	SpatialPixels
Grillas	SpatialGrid	No	SpatialPixels
Grillas	SpatialGridDataFrame	data.frame	SpatialGrid
Líneas	Line	No	
Líneas	Lines	No	Line list
Líneas	SpatialLines	No	Spatial Lines list
Líneas	SpatialLinesDataFrame	data.frame	SpatialLines
Aros (rings)	Polygon	No	Line
Aros (rings)	Polygons	No	Polygon list
Aros (rings)	SpatialPolygons	No	Spatial Polygon list
Aros (rings)	SpatialPolygonsDataFrame	data.frame	SpatialPolygons

Tabla 177: Clases de datos del paquete sp

4.3.2. Análisis espacial de patrones de puntos

Uno de los paquetes con mayores contribuciones en R, dentro de la rama de estudio que corresponde al análisis espacial de patrones de puntos, es el paquete **Spatstat**. Se trata de un paquete contribuido, escrito por Adrián Baddeley y Rolf Turner [84] que concentra una variedad de funcionalidades orientadas a la creación, manipulación y gráfica de patrones de puntos, análisis exploratorio de datos, simulación de modelos de procesos de puntos, ajuste de modelos paramétricos, test de hipótesis, entre otras funciones. Aparte de las funciones relativas al manejo de procesos de puntos en dos dimensiones, el paquete maneja patrones de líneas en dos dimensiones, patrones de puntos en tres dimensiones, y patrones de puntos espacio-temporales de múltiples dimensiones. Además, soporta el manejo de Teselaciones y conjuntos de datos aleatorios.

En este apartado vamos a demostrar algunas funcionalidades de spatstat aplicadas al manejo de puntos en dos dimensiones, tomando como ejemplo práctico un conjunto de datos de focos de calor empleados en esta tesis. El primer paso es configurar las herramientas necesarias para importar los datos a R a partir de los paquetes especificados. En primer lugar, se ejemplifica un diagrama ad-hoc de cómo funciona el proceso de importación de datos hacia spatstat a partir de archivos shapefiles mediante el uso de otros paquetes funcionales al manejo de datos (Figura 12).

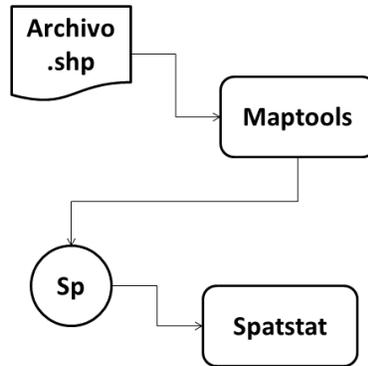


Figura 12: Diagrama de flujo del proceso de importación de datos hacia spatstat.

Una vez que los datos son leídos correctamente dentro del ambiente de R, es necesario transformarlos a los formatos específicos de lectura del paquete Spatstat. En función de ello, spatstat maneja un conjunto de formatos específicos, que a continuación se detallan:

- a) *patrones de puntos (ppp)*
- b) *ventanas (owin)*
- c) *imágenes (im)*
- d) *patrón de líneas (psp)*
- e) *taselaciones (tess)*
- f) *patrones de puntos 3d (pp3)*
- g) *patrones de puntos multi-dimensionales (ppx)*
- h) *patrones de puntos en una red linear (lpp)*

A continuación se presentan una serie de ejemplos de procesamiento de datos espaciales mediante el uso de algunos de los formatos de datos anteriormente especificados, todo ello junto al extracto de las líneas de código empleadas:

4.3.2.1. Input de *shapefiles de focos de calor (puntos)* (Fuente: CONAE) y de *Provincias (Poligonos)* (Fuente: INDEC).

En este ejemplo se presenta la metodología para procesar shapefiles de puntos y poligonos correspondientes a focos de calor y a los límites provinciales de Argentina. Los datos son importados a R, luego se les asigna la proyección correspondiente y a posterior se los transforma al formato ppp y Spatial Polygons respectivamente para puntos y poligonos.

```
require(rgdal)
require(sp)
require(maptools)
require(spatstat)
```

```
setwd('G:/Nicolas - Maestria IG -/Tesis/Bases de Datos/Focos de Calor/ParaR')
```

```
FC<- readShapePoints("focosdecalor_2008.shp")
FC_df<- FC@data
names(FC)
"LAT" "LON" "SAT" "DIA" "MES" "AÑO" "HORA" "ID_H"
proj4string(FC) <- CRS("+proj=longlat ellps=WGS84")
X <- as(S, "ppp")
class(X)
"ppp"
unitname(X) <- c("metre", "metres")
W<-X$window
```

```
marked planar point pattern: 71753 points
Mark variables: LAT, LON, SAT, DIA, MES, A.O, HORA, ID_H
window: rectangle = [-74.08808, -50.59546] x [-54.60614, - 18.71417]
metres
```

```
K <- readShapeSpatial("provincias_region")
class(K)
"SpatialPolygonsDataFrame"
df_K <- K@data
attach(df_K)
Provincias <- as(K, "SpatialPolygons")
cregions <- slot(Provincias, "polygons")
cregions <- lapply(cregions, function(Provincias) { SpatialPolygons(list(Provincias)) })
spatstat.options(checkpolygons=FALSE)
cwindows <- lapply(cregions, as.owin)
ch <- hyperframe(window=cwindows)
```

```
ch <- cbind.hyperframe(ch, K@data)
spatstat.options(checkpolygons=TRUE)
proj4string(Provincias) <- CRS("+proj=longlat ellps=WGS84")
```

```
[1] "SpatialPolygons"
attr(,"package")
[1] "sp"
```

4.3.2.2. Ejemplo 1: Cuantificación de focos de calor del año 2008 para la Provincia de Tucumán y análisis de densidad:

En este ejemplo se desarrolla una pequeña aplicación para cuantificar la cantidad de focos de calor ocurridos en la Provincia de Tucumán durante el año 2008 y a posterior se analiza la densidad de focos en función del número de focos registrados dentro de los límites provinciales en una grilla de 1 ha. de lado. Tomando el ppp del ejemplo anterior asignado a X, el cual representa el patrón de puntos de focos de calor del 2008 para todo el país, se cuantifica únicamente la cantidad de focos para el polígono número 25 que representa a la Provincia de Tucumán. En una única línea se resume tal operación

```
par(mfrow = c(1, 2))
npoints(X[cwindows[[25]])]
1063 # Numero de focos de calor en Tucumán para el año 2008
X[cwindows[[25]]]
```

```
marked planar point pattern: 1063 points
Mark variables: LAT, LON, SAT, DIA, MES, A.O, HORA, ID_H
window: polygonal boundary
enclosing rectangle: [-66.18872, -64.49614] x [-28.012733, - 26.067176] units
```

```
plot(X[cwindows[[25]]],pch=16, cex= 0.1, main = "Focos de calor" )
T_density <- density(X[cwindows[[25]]],0.01)
rainbow <- colourmap(rainbow(100),
breaks=seq(min(T_density)+25,max(T_density),length=101))
plot(density((X[cwindows[[25]]]),0.02),col=rainbow, ribbon=TRUE,ribsep=0.05,
ribwid=0.05, ribn=1024, ribscale=1)
plot(cwindows[[25]], border="black",axes=TRUE, add = TRUE)
```

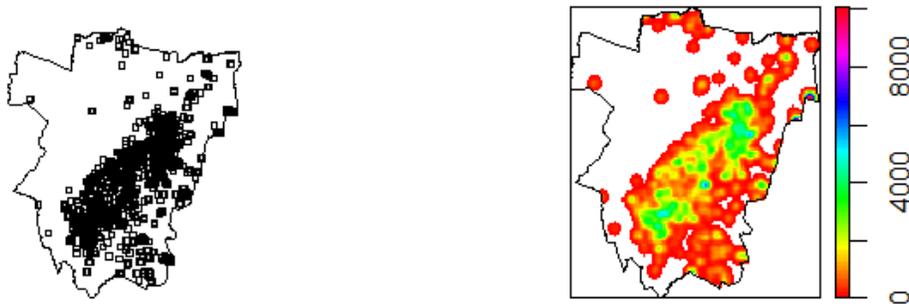


Figura 13: Cartografía de focos de calor en Tucumán (Izq.), y estimación de densidad de focos (focos/ha) para el año 2008 (der).

La densidad se calculó para este ejemplo mediante la función `density` tomando el argumento donde se selecciona el número de focos de calor para la Provincia de Tucumán, para luego asignar el resultado a una nueva variable "T_density". El resultado se grafica construyendo una paleta de colores ajustada al rango dinámico que corresponde a la densidad de focos, tomando un mínimo de 25 focos por celda, de manera tal que las zonas sin presencia de focos quedan excluidas de la paleta.

4.3.2.3. Ejemplo 2: Densidad de focos de calor a nivel Nacional para el año 2008

En este segundo ejemplo calculamos la densidad de focos de calor para todo el territorio Nacional, construyendo también, una paleta de colores ajustada. Luego se le superponen los polígonos provinciales. Se puede observar como quedan representadas las distintas regiones del país, de acuerdo a la actividad de quemas e incendios de vegetación. Las estimaciones de densidad, suelen ser una primera aproximación dentro de las técnicas de análisis de patrones de puntos, siendo un buen indicador de zonas de mayor o menor concentración de puntos, lo cual en este ejemplo, corresponde a una mayor frecuencia y proporción de quemas acotadas en el espacio.

```
Densidad <- density(X, sigma = 0.01)

rainbow < colourmap(rainbow(100),
breaks=seq(min(Densidad)+25,max(Densidad),length=101))
plot(Densidad, col=rainbow, ribbon=TRUE, ribsep=0.05, ribwid=0.05,   ribn=1024)
plot(W,border="white", add=TRUE)
plot(Provincias, add = TRUE)
```

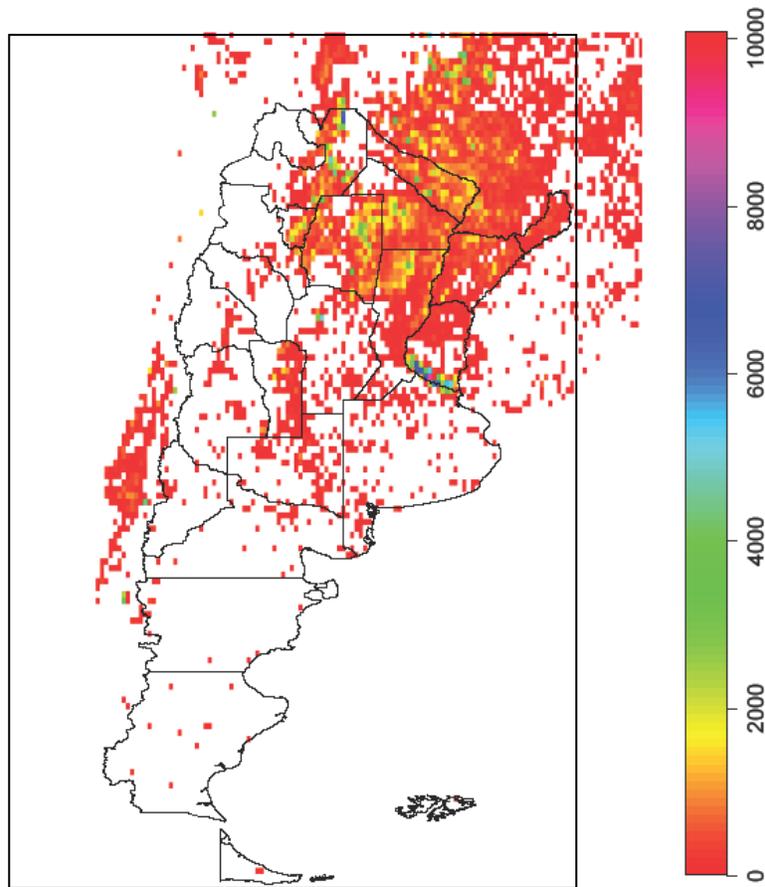


Figura 14: Densidad de focos de calor a nivel Nacional (tamaño de pixel=1ha) (año 2008).

4.3.2.4. Ejemplo 3: Cuantificación automática de focos de calor por Provincia para el año 2008 y cálculo de densidad promedio

Este es un ejemplo desarrollado para cuantificar en forma operativa y automática la cantidad de focos de calor anual para cada Provincia. Puede ser considerado como la base de un proceso en el cual, un determinado usuario pueda consultar en forma operativa la cantidad de focos de calor para distintos periodos de tiempo y sobre regiones específicas, ya sean Provincias como este caso, o bien Parques Nacionales, o sobre cartografías de tipos de vegetación. Así mismo, en el ejemplo se muestra una aplicación que permite identificar la densidad promedio de focos de calor para cada Provincia, lo cual significa un aporte sobre otro indicador que ayuda a sintetizar las características espaciales de la ocurrencia de incendios a nivel regional.

```

par(mfrow = c(1, 2))
conteo <- c(1:length(cwindows))
for (i in 1:length(cwindows)){
  conteo[i] <- npoints(X[cwindows[[i]])]
  cat(i,":", conteo[i], fill=TRUE)}
barplot(conteo, xlab="Provincias",ylab="Numero de Focos", names.arg=c("Ba", "Cat",
"Cf","Cha","Chu", "Cba", "Cor","E.R", "For","IM","Juj","Lp", "Lr","Mza","Mis", "Nqn",
"Rn","Sa", "Sj","Sl","Scrz","Sfe","Se","Tf","Tu"))

```

```

densidad <- c(1:length(cwindows))
for (i in 1:length(cwindows)){
  densidad[i] <- summary(X[cwindows[[i]])$intensity
  cat(i,":", densidad[i], fill=TRUE)}
barplot(densidad, xlab="Provincias",ylab="Densidad de Focos", names.arg=c("Ba", "Cat",
"Cf","Cha","Chu", "Cba","Cor","E.R", "For","IM","Juj","Lp", "Lr","Mza","Mis", "Nqn",
"Rn","Sa", "Sj","Sl","Scrz","Sfe","Se","Tf","Tu"))

```

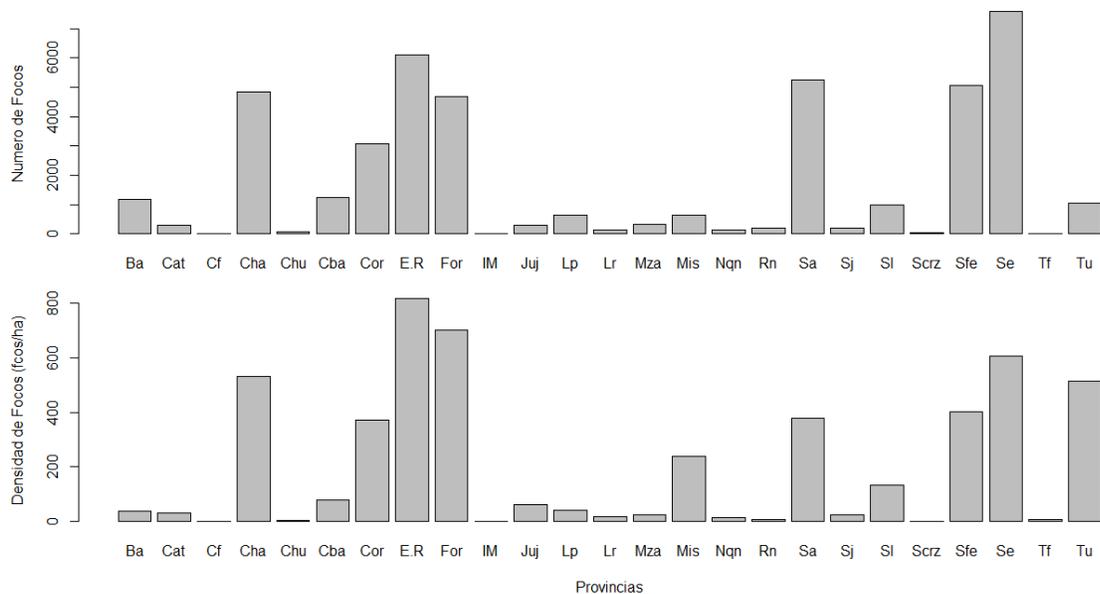


Figura 15: Cuantificación del número de focos detectados para cada Provincia (arriba), y el calculo de la densidad promedio de focos (año 2008).

4.4. *Materiales y Métodos*

4.4.1. Área de estudio

El trabajo se desarrolló dentro de los límites de la ventana de observación de la antena MODIS situada en CONAE, falda del Carmen (Lat: -31.523° , Lon: -64.462°). La superficie de observación comprende a todo el territorio Nacional de Argentina, Islas Malvinas, Chile, Uruguay, Paraguay, sur de Bolivia y sur de Brasil (figura 16).

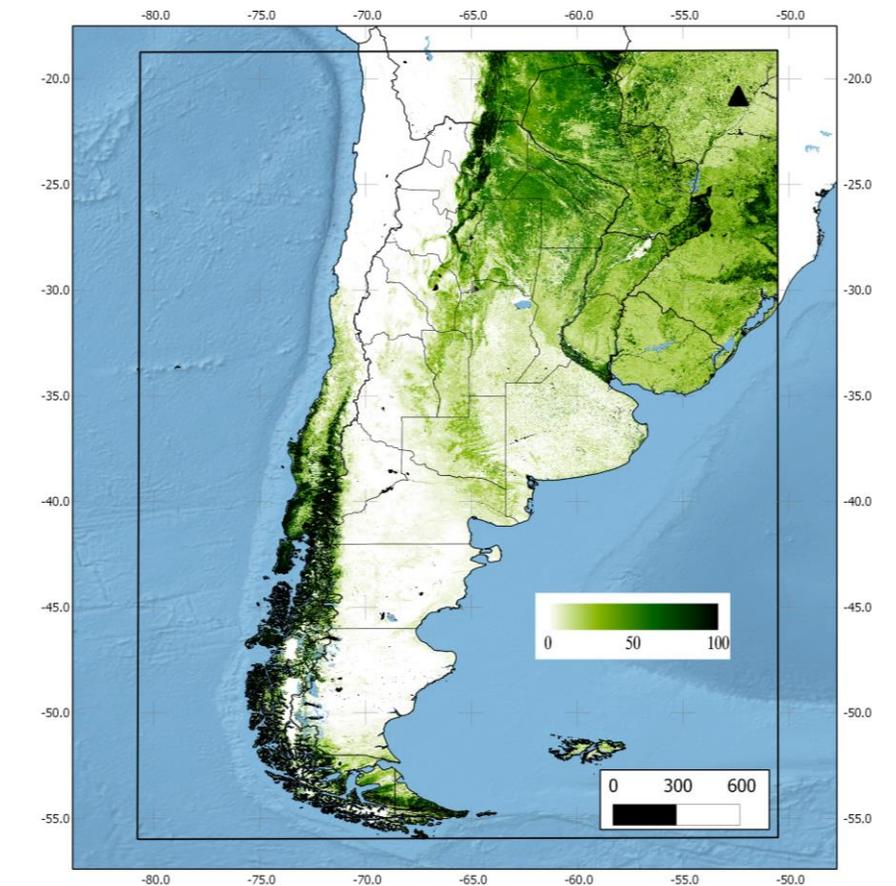


Figura 16: Área de estudio del producto MoDIIA_p2

El área corresponde a una superficie aproximada de 5.5 millones de Km² de tierra firme, comprendiendo una amplia muestra de regímenes de incendios, actividades humanas y un amplio gradiente climático. En la figura 16 se puede observar la cobertura de árboles expresado como un gradiente porcentual, donde los colores verdes oscuros indican coberturas densas, y su gradiente hacia el blanco, menor densidad [85]. Dentro del área, se han seleccionado 10 sitios de validación para poner a prueba el algoritmo y validarlo. Los sitios fueron seleccionados en

función de la presencia de incendios, de los cuales se cuentan con información del área quemada. Las áreas se distribuyen en la Provincia de Córdoba, San Luis, Tucumán, Entre Ríos y Santa Fe, para Argentina. En Paraguay se seleccionaron sitios en las regiones del centro y norte, y en Brasil un sitio en los límites fronterizos con Paraguay.

4.4.2. Datos Utilizados

Se utilizaron datos de focos de calor MODIS, provistos por la CONAE para los periodos, 2007, 2008, 2009, 2010. Los datos están disponibles en la página web de CONAE (www.conae.gov.ar) con una frecuencia diaria para cada observación realizada por las plataformas Aqua y Terra en archivos de texto. Los datos fueron compilados considerando las observaciones correspondientes a ambas plataformas para cada año estudiado. El procesamiento de la base de datos anual se realizó mediante un programa ad-hoc diseñado para facilitar el manejo de los archivos de texto. La estructura de los datos, fue organizada a partir de los datos de Latitud, Longitud, día, mes, año, horario y plataforma de observación, para la ventana de estudio (W).

$$W = [0, l] \times [0, l]$$

$$S \subset R^2$$

$$S = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)) \quad n \geq 1$$

La frecuencia de revisita de MODIS permite obtener hasta cuatro observaciones diarias, correspondiendo a la plataforma Terra AM los horarios 10:30 y 22:30 y Aqua PM 13:30 y 01:30 aproximadamente. La descripción de los productos de focos de calor disponibles, algoritmos y versiones actualizadas, puede consultarse en la guía de usuarios de productos de focos de calor MODIS (<http://modis-fire.umd.edu/products.asp>)

Los datos utilizados para la validación del producto de eventos de incendio, corresponden a imágenes provistas por el satélite Landsat TM (Thematic Mapper) y por el satélite CBERS (China-Brazil Earth-Resources Satellite) de 30 y 20 metros de resolución espacial respectivamente. Para las imágenes Landsat se seleccionaron las bandas correspondientes al Rojo (0,63-0,69 μ m), IRc (0,76-0,90 μ m), SWIR (10,4-12,5 μ m) y para CBERS las bandas correspondientes al Verde (0,52 – 0,59 μ m), Rojo (0,63 – 0,69 μ m) y IRc (0,77 – 0,89 μ m) aptas para detectar áreas quemadas.

La selección de imágenes, se realizó mediante una búsqueda de áreas de alta densidad de focos de calor, donde se registraron cicatrices de áreas quemadas definidas para el periodo post-fuego de los eventos seleccionados para su validación.

La localización y distribución espacial de los datos de focos de calor para toda el área de estudio, se describe como una realización de un proceso de puntos estocástico que a continuación se presenta en las siguientes fases de procesamiento.

4.4.3. Esquema Metodológico

Se presenta el diagrama metodológico desarrollado de acuerdo a las distintas fases de procesamiento ejecutadas (Figura 17). Los datos entran al sistema a partir de archivos con formato shapefiles anuales de focos de calor. Luego, cada uno de los archivos anuales es separado en archivos mensuales, lo que se identificó como una fase de agrupamiento temporal. A posterior, los archivos mensuales son agrupados espacialmente de acuerdo a un proceso de filtrado de focos de calor (4.4.4), que permite obtener un conjunto de objetos de focos residuales y un conjunto de focos aglomerados. A esta instancia, se desechan los objetos residuales, y se procede a trabajar con los objetos de focos aglomerados. Sobre estos objetos, se aplican dos tipos de operaciones de geometría computacional: triangulaciones de Delaunay y diagramas de Voronoi. Ambas operaciones tienen el objetivo de construir estructuras poligonales trazadas a partir de los focos aglomerados. Una vez obtenidas las estructuras se procede a estimar la forma de tales estructuras, de acuerdo a un estimador de formas denominado alpha-shape. El resultado de la operación completa, termina con la salida de archivos shape poligonales a nivel mensual correspondientes a eventos de incendios.

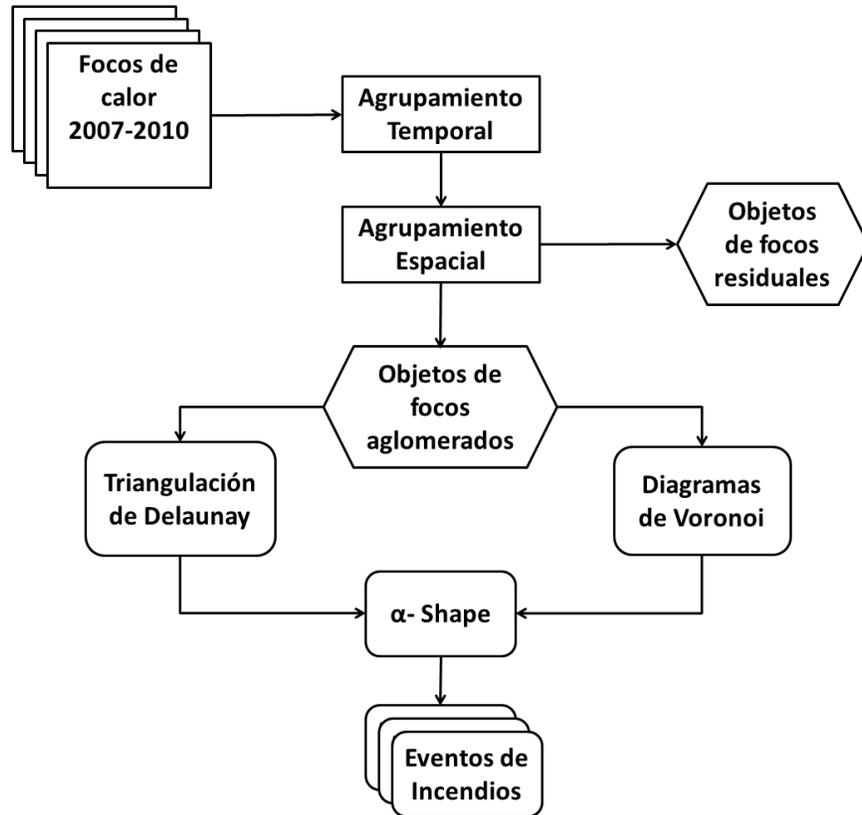


Figura 17: Esquema metodológico del proceso de detección de eventos de incendio.

4.4.4. Filtrado de focos de calor

La primera fase del proceso estuvo orientada a clasificar el conjunto de focos de calor en dos sub-conjuntos de distinta densidad. Básicamente, la idea es sin incurrir en la pérdida de información relevante, filtrar los objetos de focos residuales, cuya distribución espacial se presenta como un patrón de puntos independientes entre sí [86]. En otros términos, el objetivo de esta fase de filtrado es identificar regiones de mayor densidad y desconectarlas del resto de los datos, que serán eliminados. Tales regiones se clasifican en esta primera fase, como objetos espaciales aglomerados ó clústeres, mientras que las regiones con menor densidad se las clasifican como objetos de focos residuales.

4.4.4.1. *Análisis exploratorio de datos*

El método utilizado emplea una técnica de reconocimiento de patrones de puntos que forma parte de novedosos métodos para el análisis exploratorio de datos. La técnica se basa en medir la distancia K esima del vecino más cercano para cada punto dentro del patrón de datos. Luego, se emplea un algoritmo de “esperanza-maximización” (EM), por su sigla en inglés *expectation-maximitation*, para ajustar una distribución mixta de los datos al vecino más cercano. Los componentes mixtos representan los objetos aglomerados, y los objetos de ruido o residuos. El modelo mixto puede ser utilizado para clasificar cada punto dentro de un objeto aglomerado, o como un objeto residuo [87].

En primera instancia no se asume conocer el número ni la forma de los objetos, entendiendo como tales a las regiones de densidad diferente, lo cual lo hace flexible para ser aplicado sobre una variedad de situaciones de dependencia espacial. Por ejemplo, para regiones de mayor densidad de puntos, como puede ser el caso de un evento de incendio, la distancia K del vecino más cercano será menor en promedio, que para un patrón de focos distribuidos en forma aislada. La teoría que subyace y que pretende describir al problema, se basa en asumir la distribución de los focos de calor como un proceso de puntos aleatorio de tipo Poisson. Específicamente, se asume que la distribución espacial de focos está definida por dos procesos de distribución superpuestos, es decir, como un subconjunto de focos aislados, superpuesto a un subconjunto de focos aglomerados. La característica interesante, es entender que ambos procesos coexisten bajo un mismo modelo de distribución compuesto, considerando que la localización de los objetos aglomerados se encuentra distribuida en ubicaciones restringidas del área de estudio. En síntesis, el método considera la distribución de focos de calor como un modelo de dos procesos Poisson superpuestos e independientes, donde la distribución de las distancias entre focos es aproximadamente una mezcla de tales distribuciones [87].

La simulación de procesos de patrones de puntos como la implementación de la primera fase de filtrado de focos de calor es posible implementarlas mediante funciones incorporadas en el paquete spatstat presente en el software R [84], [86]. Más adelante en el desarrollo de las fases del procesamiento que aquí se propone, se presentan diversas figuras acompañadas de fragmentos de códigos y funciones utilizadas

Con el objetivo de poner al lector en contexto sobre las funciones que se emplean en esta primera fase, y a posterior en las siguientes, se presenta a continuación la teoría sobre las propiedades de un proceso *poisson* de puntos en un plano finito $W \subset R^2$. Tales propiedades se definen como:

1. La probabilidad de observar $n \in \mathbb{N}_0$ puntos en cualquier subconjunto $A \subset W$, sigue la distribución *Poisson*:

$$\Pr(N_A = n) = e^{-\eta\mu(A)} [\eta\mu]^n / n!, \text{ donde } \eta > 0 \text{ es la densidad, y } \mu(A) \text{ es el \u00e1rea de } A.$$

2. Si A_1, A_2 , no tienen elementos en com\u00fan, entonces $N(X \cap A_1)$ y $N(X \cap A_2)$ son variables aleatorias independientes $A_1 \cap A_2 = \emptyset$

En base a estas propiedades, se consider\u00f3 implementar una funci\u00f3n que simula distribuciones espaciales aleatorias de puntos con cierto grado de aglomeraci\u00f3n. Se simula un proceso Poisson superpuesto, a partir de concentrar en determinadas zonas del dominio, una mayor cantidad de puntos. Para una compresi\u00f3n acertada, de ahora en m\u00e1s se emplear\u00e1 el t\u00e9rmino “ppa” para referirse a “*procesos de puntos poisson aglomerados*”. Sint\u00e9ticamente, los ppa son modelos que incorporan expl\u00edcitamente la formaci\u00f3n de grupos y por lo tanto proporcionan la base adecuada para simular patrones puntuales con eventos agrupados.

Sobre los ppa generados se aplica la funci\u00f3n que se encontr\u00f3 adecuada para clasificar los puntos de acuerdo a valores de distancia K crecientes, con el objetivo de caracterizar el efecto del valor de la distancia K sobre la clasificaci\u00f3n en grupos aglomerados y residuales. La funci\u00f3n se llama “nnclean” [87]

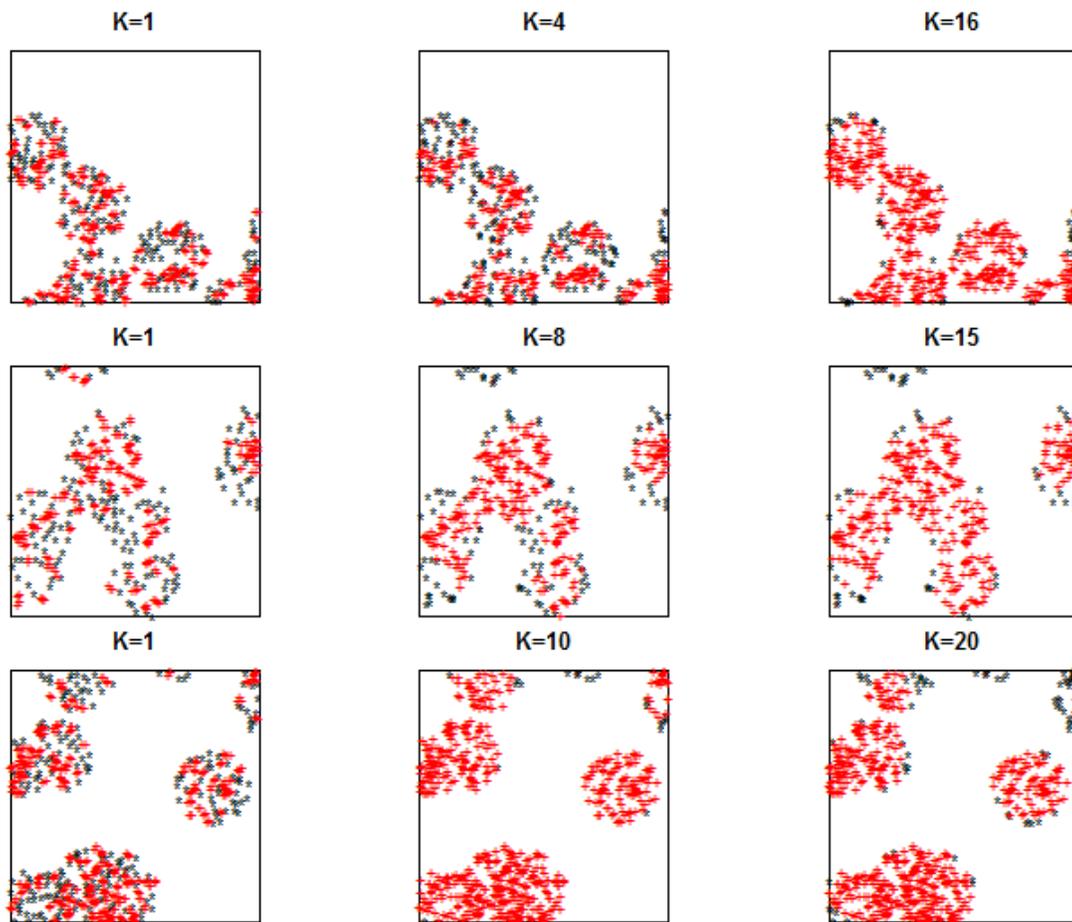


Figura 18: Se representan simulaciones en base a la realización del proceso de puntos poisson aglomerado (ppa), clasificadas de acuerdo a un valor K creciente. En cruces rojas (+) se identifican los puntos con un nivel mayor de aglomeración y en asteriscos negros (*), los puntos que se clasifican como residuales

```

require(spatstat)
# Cada cluster consiste en 10 puntos en un disco de radio 0.15
par(mfrow=c(1,2))
nclust <- function(x0, y0, radius, n) { return(runifdisc(n, radius, centre=c(x0, y0))) }
ppa <- rPoissonCluster(10, 0.2, nclust, radius=0.15, n=10)
par(pch=20)
plot(ppa)
# Función para la clasificación de puntos: cluster = puntos aglomerados, noise= puntos
residuales.
ppa.cl <- nnclean(ppa, 1) # k=1
plot(ppa.cl, chars=c(".", "+"), cols=1:2)

Iteration 1    logLik = 644.849808597924    p = 0.4979
Iteration 2    logLik = 640.384281900639    p = 0.4776
Iteration 3    logLik = 637.83844433768    p = 0.465
Iteration 4    logLik = 636.230838515818    p = 0.4562
Iteration 5    logLik = 635.147195725673    p = 0.4494
Iteration 6    logLik = 634.382419146701    p = 0.4439
Iteration 7    logLik = 633.823470160024    p = 0.4392
Estimated parameters:
p [cluster] = 0.43922
lambda [cluster] = 322.98
lambda [noise] = 121.95
  noise feature
  "." "+"

```

Tabla 18: Extractos del código empleado en la fase de reconocimiento de patrones para el filtrado de focos de calor.

Las simulaciones generadas nos permiten observar cómo afecta el valor de la distancia K sobre el resultado de la clasificación de los puntos. A menor distancia de K, un menor número de puntos se clasifican como aglomerados, mientras que a mayores valores de K, se produce el efecto contrario, donde un mayor número de puntos quedan como aglomerados. Este resultado, es función de la distribución de las distancias de los puntos, lo cual como se explicó, se asume como una mezcla de dos procesos aleatorios superpuestos. Los datos simulados, nos permite aproximarnos al proceso por el cual se detectan los focos de calor que buscamos eliminar del análisis, es decir aquellos que consideramos como focos aislados o falsas detecciones, buscando minimizar la pérdida de información substancial.

Seleccionar el valor de K es un trabajo crítico y determinante por parte del operador que configure este primer paso del proceso. Llevado a un caso real, tiene que ver con la pericia de identificar el valor adecuado con el cual se logre separar convenientemente los eventos de incendios, de aquellos focos de calor aislados que no representan eventos. En la práctica se sugiere elegir el valor de K como un valor similar al mínimo tamaño que se pretende detectar como un evento, o por lo contrario, el valor más grande que uno considere necesario para

detectar focos residuales. Esto queda claro en la figura 18, donde el mínimo valor de $K=1$, permite identificar en promedio un número mayor de objetos aglomerados. En la práctica, el filtrado de focos en forma errónea, puede influir a posterior en errores de omisión o comisión, de acuerdo sea el caso.

De cara a una implementación automática para identificar el valor de K , es recomendable que el usuario, pueda hacer distintas pruebas de análisis con valores K crecientes, hasta tanto logre observar que las mejoras en la separación de los datos se hacen lo suficientemente pequeñas, que ya no sea necesario seguir incrementando dicho valor. De acuerdo con [87] un camino a seguir para la selección del valor K , es el uso de medidas de separación basadas en entropía, de tal forma que el valor de K pueda ser elegido dentro de un rango razonable de valores, allí donde la entropía tiende a saturarse en función a los valores crecientes de K .

A continuación se presenta la segunda fase de procesamiento cuya base de procesamiento depende del filtrado precedente.

4.4.5. Caracterización de formas y superficies quemadas

La estimación de la superficie quemada mediante técnicas basadas en focos de calor se limitan a pocos trabajos publicados. Los trabajos encontrados en la bibliografía emplean información espectral de una imagen post-fuego, con el propósito de analizar los cambios producidos en la respuesta espectral de la superficie quemada, causados por los daños estructurales, la presencia de cenizas, y alteraciones en el contenido de humedad de la vegetación, entre otros factores [88][40], [89–95]. Sin embargo, de acuerdo a algunos trabajos, la detección de áreas quemadas presenta ciertas limitaciones, dado a la omisión de incendios pequeños, quemas de sotobosque, alteraciones en la señal del quemado, entre otros aspectos. Aun así, comparativamente a la detección de fuegos activos, en general se considera ser una aproximación más precisa.

Los productos de focos de calor, en su nivel de procesamiento más básico, contienen información sobre la localización y el tiempo de su ocurrencia al momento del pasaje del satélite, usualmente representados como mascarar o como listas de píxeles quemados. Para ciertas aplicaciones, tales observaciones son agregadas en grillas de menor resolución espacial (ej. $0.5^\circ \times 0.5^\circ$) sobre períodos diarios o acumulados mensuales, obteniendo como resultado grillas de conteos de píxeles quemados. Es importante destacar que aunque los productos de focos de calor logran capturar diversos aspectos de la distribución espacial y características sobre la estacionalidad de los incendios, es difícil lograr relacionarlos con el área quemada actual, dado a que existen diversas dificultades relacionadas a las diferencias temporales de muestreo, variaciones relativas a las condiciones de los combustibles, condiciones de nubosidad, diferencias en el comportamiento del fuego y otras cuestiones relacionadas a las diferencias en resolución espacial que existe entre los sistemas de sensores utilizados [78], [96], [97]

No obstante, dado que la detección de áreas quemadas no es un aspecto trivial de resolver [17], y además las bases de datos existentes que abarcan largos períodos de observación presentan importantes inconsistencias [45], [98], [99]; se comenzó a utilizar los focos de calor como una alternativa substituta y viable de cara a aproximar estimaciones de superficie quemada [45], [78], [91], [100].

Intuitivamente, la aproximación más común, es la asunción de que el área quemada es proporcional a la cantidad de fuegos activos en una zona determinada durante un periodo de tiempo fijado. Sin embargo, de acuerdo a la bibliografía relevada, los resultados de validación que se han obtenido a partir de asumir dicha aproximación, varían enormemente, en particular si se considera la cuestión de la escala a la cual se aplica dicha relación [45].

En este trabajo, se presenta un nuevo método para caracterizar las superficies quemadas, mediante técnicas de análisis espacial de procesos de puntos, y operaciones de geometría computacional ejecutadas en forma secuencial, que buscan sortear algunos de los problemas relevados en otros trabajos [100]. Tales operaciones, implican obviar la dependencia metodológica en el uso de grillas, lo cual implica por lo general en incurrir a pérdidas de información. Este nuevo método, de acuerdo al levantamiento bibliográfico es único y presenta ventajas consistentes, fundamentalmente en relación a la construcción de la forma y la estimación de la superficie quemada. A continuación se describen las etapas metodológicas desarrolladas:

4.4.5.1. Construcción de formas mediante triangulación de nodos

La segunda fase del proceso, se inicializa a partir de los focos de calor aglomerados identificados como clústeres, habiendo eliminado en esta instancia, todos aquellos focos que fueron clasificados como residuos en la primera fase de filtrado. El método de esta segunda fase, se basa en la técnica de triangulación conocida como "Delaunay", empleada aquí con el objetivo de reconstruir superficies a partir de un set de nodos finitos, arbitrariamente distribuidos en el plano [101]. La técnica de triangulación aplicada, consiste en unir los nodos (focos de calor) distribuidos en el plano, de modo tal de construir triángulos que forman superficies pequeñas, y que en su total, conforman la superficie total del objeto dada por la cantidad total de nodos del mismo.

El método se define tal que, dado un número finito de nodos $P_i = (x_i, y_i), i = 1, \dots, N$ distribuidos arbitrariamente en el plano, la triangulación de los nodos consiste en un conjunto de triángulos que parten el casco convexo de los nodos considerando las siguientes propiedades: 1) los vértices de los triángulos correspondan con los nodos, 2) ningún triángulo contiene a un nodo, excepto que a su propio vértice, 3) el interior de los triángulos es de pares disjuntos, 4) la unión de los triángulos es la envolvente convexa del set de nodos (el conjunto convexo más pequeño que contiene a los nodos), y 5) el círculo definido por los tres vértices de cada triángulo no debe

contener ningún nodo en su interior. Las primeras cuatro propiedades definen la triangulación, y la quinta corresponde al caso que una triangulación se acerque lo más posible a ser equiangular. Esta última propiedad, hace de la triangulación un método apropiado para la resolución de problemas tales como el del camino más corto y la interpolación basada en triángulos.

La dualidad de la triangulación de Delaunay es el diagrama de Voronoi [102], el cual particiona al plano en un conjunto de polígonos, cada uno asociado a un nodo y consistiendo de los puntos cercanos a ese nodo, más que cualquiera de los otros nodos presentes. Los vértices de los polígonos son los circuncentros de los triángulos de la triangulación de Delaunay, y los lados de los polígonos caen en los bisectores perpendiculares de los bordes de la triangulación. De este modo, es sencillo obtener cualquier taselación como una representación de la otra. Tales estructuras son ampliamente conocidas por proveer alternativas eficientes dentro de las aplicaciones de geometría computacional [101], [103], [104](Figura 19).

Utilizar esta técnica para construir la superficie intersectada por los nodos, y de esta forma poder construir superficies representativas de eventos de incendio, debe tener en primera instancia ciertos recaudos de cara a entender el proceso de construcción y además considerar, como se explicó anteriormente, sobre las limitaciones que presenta el uso de focos de calor en cuanto a su resolución espacial y temporal. Por lo tanto, en relación a lo último, es importante destacar las siguientes precauciones: a) Los focos de calor acumulados en forma diaria para su análisis temporal pueden presentar errores espaciales y temporales [105], b) Para el caso de incendios conocidos, donde no se han detectado focos de calor, puede deberse a varios motivos: obscurecimiento por nubes ó humo [106], falta de cobertura, o problemas relativos a una mala clasificación en la máscara tierra/mar que forma parte del proceso de detección [56]. Tales errores, especialmente el obscurecimiento por motivos de nubosidad/humo, y más aún por la falta de cobertura debido a los tiempos de revisita, se traducen en no poder caracterizar suficientemente el evento, como función de la falta de focos, lo cual puede por ejemplo, simplificar las formas, crear islas no existentes, o no lograr conectar nodos extremos. Todo esto en el contexto de las dificultades generales que se asumen a la hora de usar focos de calor para estimar superficies quemadas.

A continuación se presentan un conjunto de simulaciones de puntos aglomerados que representan focos de calor donde se considera a cada punto como un nodo, los cuales se triangulan entre si para construir la superficie y la forma que caracteriza al subconjunto de puntos con mayor densidad. A posterior se presenta las líneas de código desarrolladas.

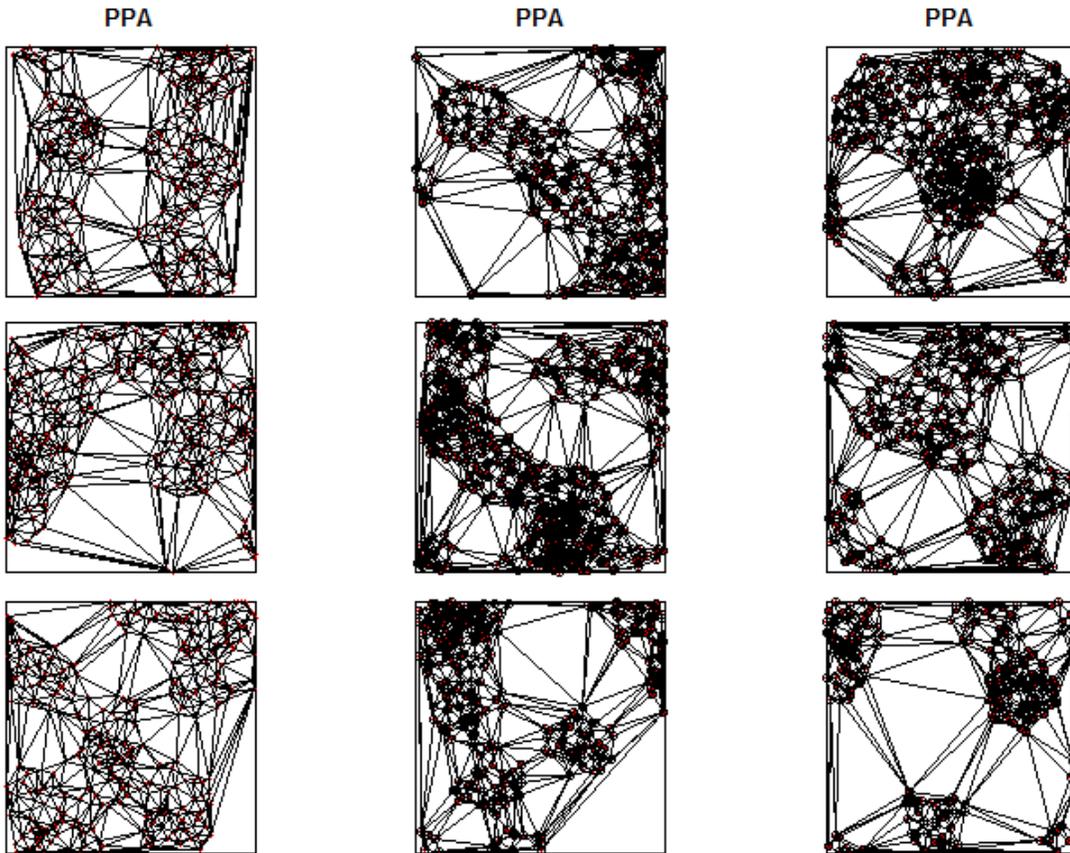


Figura 19: Se presentan diversas simulaciones de procesos de puntos poisson aglomerados (ppa) , a los cuales se les aplica la función de triangulación de Delunay. Cada uno de los gráficos indica un ppa con una su distribución aleatoria correspondiente.

```

par(mfrow=c(1,3))
PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(PPA.tri, do.points=F, add = TRUE)
PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(PPA.tri, do.points=F, add = TRUE)
PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(PPA.tri, do.points=F, add = TRUE)

```

Tabla 19: Extractos del código empleado en la fase de construcción de formas mediante triangulación de nodos.

Entonces, mediante el uso de estas estructuras, el objetivo específico de esta fase, es lograr construir una red de nodos interconectados sobre aquellas zonas de mayor densidad, que a posterior servirá como una superficie plana para la delimitación del perímetro quemado. A esta instancia se asume que los datos de entrada, ya cuentan con el proceso de filtrado de focos aislados y que los puntos, no presentan interacción entre si, tal cual lo define la distribución *Poisson*.

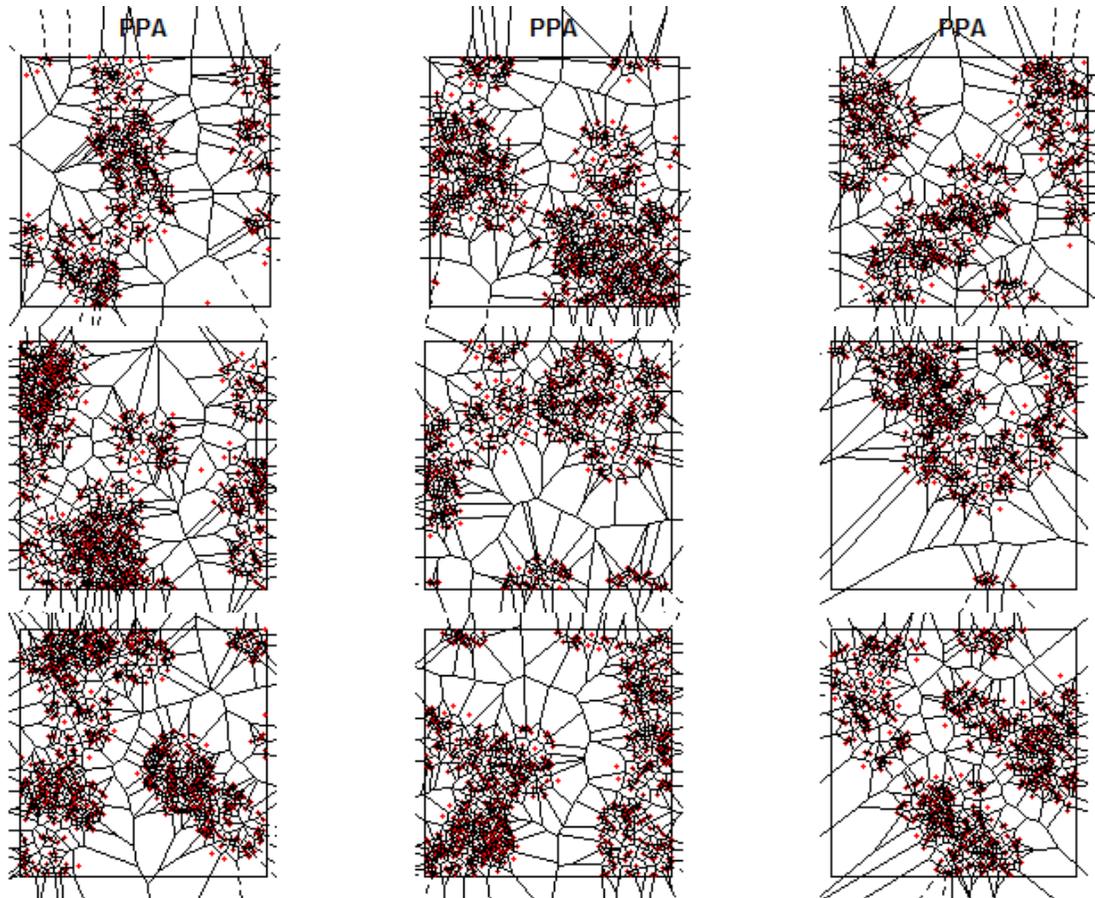


Figura 20: Se presentan diversas simulaciones de procesos de puntos poisson aglomerados (ppa) , a los cuales se les aplica los diagramas de Voronoi.

```

par(mfrow=c(1,3))

PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="vor", lwd = c(1,1))

PPA <- rPoissonCluster(5, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="vor", lwd = c(1,1))

PPA <- rPoissonCluster(5, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.040
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="vor", lwd = c(1,1))

```

Tabla 20: Extractos del código empleado en la fase de construcción de formas mediante diagramas de Voronoi.

Los diagramas de Voronoi, como se observa en la figura 20, pueden ser empleados para delimitar zonas de puntos aglomerados. El análisis de aglomerados o clústeres, implica determinar la partición de un determinado conjunto de puntos, en sub conjuntos u objetos, como ha sido explicado en la primera fase de filtrado de este capítulo. En este contexto, tales objetos tienen caracteres similares entre si, y disimilares entre objetos, lo cual en definitiva es lo que aquí entendemos como objetos de distinta densidad, clasificados de acuerdo a nuestro método, mediante una función de distancia K al vecino más cercano. De tal modo, las propiedades de los diagramas de Voronoi permiten revelar la proximidad que existe entre los objetos formados. Por ejemplo, la presencia de objetos aglomerados dan lugar a regiones de Voronoi de superficies más chicas y de formas similares [107].

La dualidad que existe entre los diagramas de Voronoi y la triangulación, permiten finalmente, capturar los puntos que forman objetos de mayor densidad, en estructuras geométricas cerradas que, por sus características permiten reconstruir las formas que presentan los diversos tipos de aglomeraciones detectadas en un plano como eventos de incendio (Figura 21)

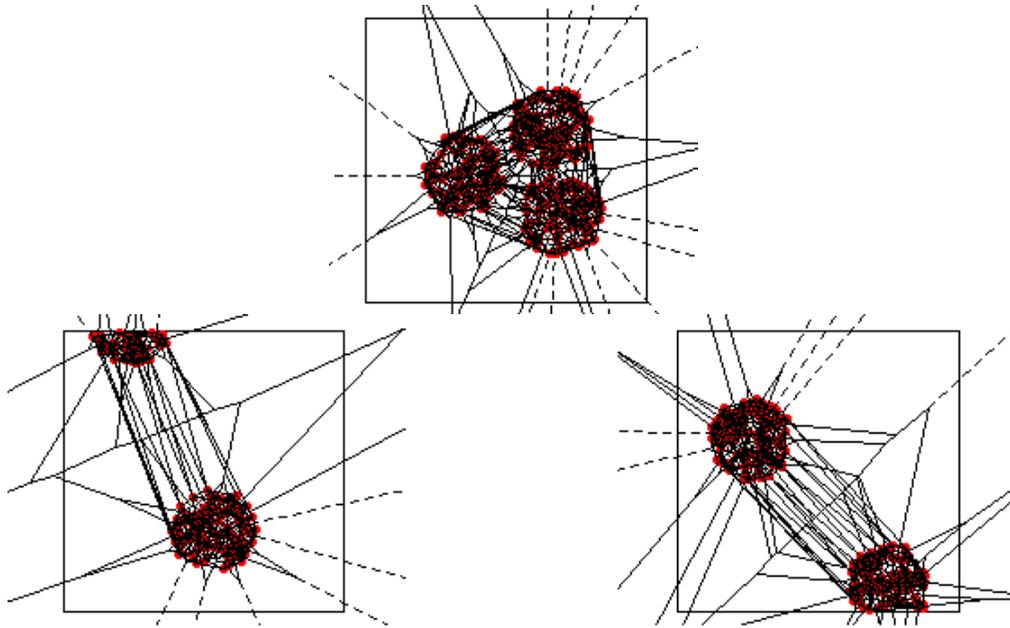


Figura 21: Diagramas de Voronoi y Triangulación de Delaunay sobre un proceso de puntos poisson aglomerados (ppa) con distintos niveles de asociación espacial.

```

par(mfrow=c(1,2))

PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="both", lwd = c(1,1))

PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="both", lwd = c(1,1))

```

Tabla 21: Extractos del código empleado en la fase de construcción de formas mediante la combinación del método de triangulación de nodos y diagramas de Voronoi.

En la siguiente fase de procesamiento, se plantea la etapa donde se busca delimitar los bordes de los objetos detectados, con el fin de cerrar las estructuras poligonales que representan los eventos de incendios:

4.4.5.2. Delimitación de bordes mediante una variante del casco convexo: “ α -shape”

La tercera fase del proceso tiene como objetivo identificar los bordes externos de las estructuras geométricas formadas por la red de nodos triangulados en la fase anterior, con el propósito de caracterizar su forma, identidad y superficie. El método que se propone para cumplir este objetivo, es implementar una función que permita estimar con precisión la “forma” que poseen las estructuras identificadas a partir de un conjunto de puntos distribuidos en forma aleatoria en el plano.

Como estimadores de formas, uno de los más conocidos es el casco convexo, que en la práctica se utiliza como un estimador orientado a formas convexas, lo cual lo hace limitado para el caso de querer estimar otros tipos de formas no convexas. Un estimador más flexible que consideramos para nuestra aplicación es el “ α -shape” desarrollado por [108], cuya flexibilidad permite reconstruir diversos tipos de formas, basado en una generalización de las definiciones de casco convexo [109].

El estimador de formas α -shape permite aproximar la construcción de bordes de un conjunto de puntos, lo cual, significa para nuestro caso, una herramienta ideal de cara a la flexibilidad requerida en la construcción simultánea de un gran número de objetos con formas irregulares.

La implementación del α -shape se basa en la íntima relación que existe entre esta forma y las triangulaciones de Delaunay. Basado en la información tanto de las triangulaciones de Delaunay como de los diagramas de Voronoi, es posible construir el α -shape para un valor dado de $\alpha > 0$.

La triangulación de un conjunto de puntos finitos definen estructuras internas que forman, sub-grafos, de los cuales, el α -shape es uno de ellos. Estas sub-estructuras, son las que nos interesa detectar con este método (Figura 22).

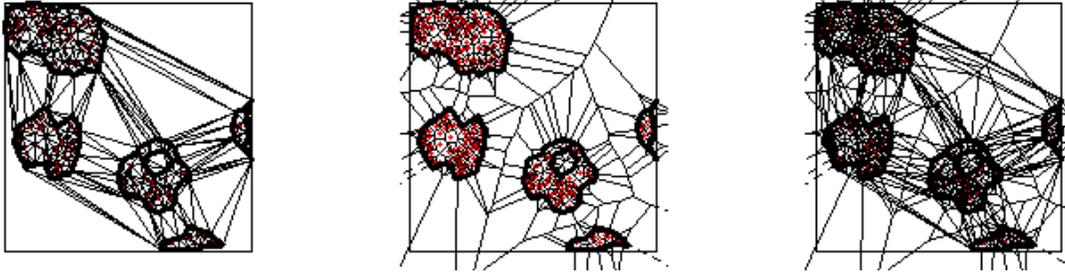


Figura 22: Se presentan simulaciones ppa, donde se ejemplifica el poder de caracterización de la forma del α -shape, presentándose de izquierda a derecha la Triangulación de Delaunay, los diagramas de Voronoi y su superposición.

```

par(mfrow=c(1,3))

PPA <- rPoissonCluster(2, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="both", lwd = c(1,3))

PPA <- rPoissonCluster(5, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="vor", lwd = c(1,3))

PPA <- rPoissonCluster(5, 0.2, nclust, radius=0.15, n=100)
PPA.tri <- tri.mesh(PPA, y = NULL, duplicate = "remove")
alpha <- 0.040
alphashape <- ashape(PPA.tri, alpha = alpha )
plot(PPA,pch=20, cols="2")
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, wlines="both", lwd = c(1,3))

```

Tabla 22: Extractos del código empleado en la fase de delimitación de bordes mediante el estimador de formas alphashape.

El algoritmo se basa en la noción de puntos α -extremos, y puntos α -vecinos. Un punto X_i se determina como α -extremo, si existe un círculo abierto de radio α con X_i en su borde, y que no contiene puntos. Se denota, que si un punto X_i cae en el casco convexo de X_n , entonces X_i

es un α -extremo para todo $\alpha > 0$. Si X_i no cae en el casco convexo solo es necesario calcular las distancias desde X_i a los vértices de la celda Voronoi V_i . Luego X_i es un α -extremo para todo α que satisface $0 < \alpha \leq \max \{ \|X_i - v\|, v \text{ vértice de } V_i \}$.

Para encontrar al punto α -vecino se considera el borde de la triangulación de Delaunay que conecta los puntos X_i y X_j , y a su borde dual del diagrama de Voronoi. Los puntos X_i y X_j son α -vecino para todo α que satisface $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$, donde α_{\min} y α_{\max} están determinados por la posición de X_i y X_j con respecto a los vértices del borde Voronoi dual.

La forma del estimador es posible controlarla mediante el parámetro α . Valores lo suficientemente altos, harán una forma idéntica al casco convexo de la muestra de puntos. Mientras que valores decrecientes de α suficientemente bajos, reducen las formas hasta llevar la muestra al conjunto vacío. La figura 23 muestra ejemplos simulados mediante un proceso *ppa*, a los cuales se aplican valores crecientes de α . Se puede observar de izquierda a derecha cómo se controla la forma de los objetos mediante la ejecución de distintos valores de α .

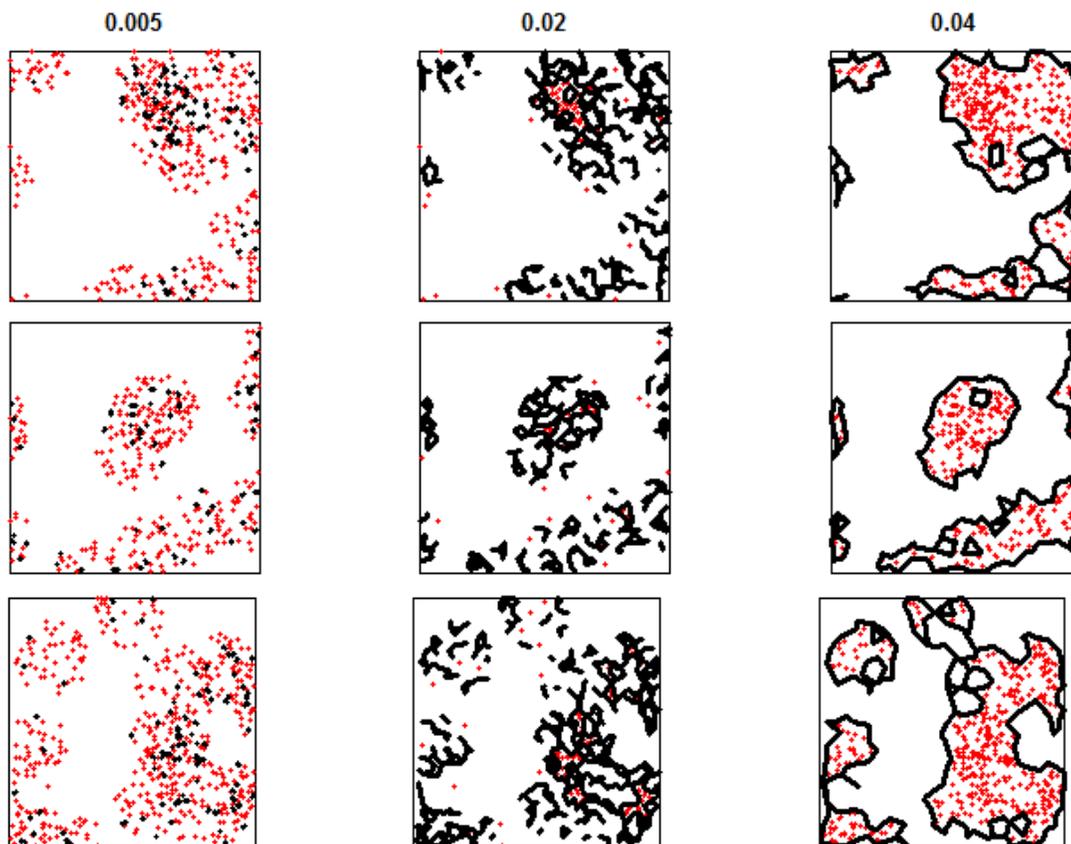


Figura 23: Ejemplos de la influencia del parámetro α sobre las formas del α -shape. De izquierda a derecha se presentan simulaciones basadas en procesos poisson aglomerados (*ppa*) con un tamaño para $\alpha = 0.05, 0.02$ y 0.04 .

```

par(mfrow=c(1,3))

rpc.tri <- tri.mesh(rpc.cl, y = NULL, duplicate = "remove")
plot(rpc,pch="*")
plot(rpc.tri, do.points=F, add = TRUE)

par(mfrow=c(1,3))
alpha <- 0.005
alphashape <- ashape(rpc.tri, alpha = alpha )
plot(rpc, chars=c(".", "+"), cols=1:2, main = alpha)
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, lwd = c(1,3))

alpha <- 0.020
alphashape <- ashape(rpc.tri, alpha = alpha )
plot(rpc, chars=c(".", "+"), cols=1:2, main = alpha)
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, lwd = c(1,3))
alpha <- 0.040
alphashape <- ashape(rpc.tri, alpha = alpha )
plot(rpc, chars=c(".", "+"), cols=1:2, main = alpha)
plot(alphashape, add = TRUE, wpoints = F, lwd = c(1,3))

```

Tabla 23: Extractos del código empleado en la fase de delimitación de bordes mediante el estimador de formas alphashape. Puesta a prueba de valores α .

4.5. Resultados

A continuación se presentan los resultados de implementar un código basado en R para toda la cadena de procesamiento desarrollada en base al esquema metodológico presentado en la sección [4.4.3](#).

Los resultados se presentan en cuatro partes: 1) En la primera, se presentan los resultados en base a simulaciones de focos de calor obtenidas a partir de modelos Poisson no homogéneos, 2) en la segunda se presentan los resultados obtenidos en base a datos reales de focos de calor MODIS, luego 3) la tercera parte incluye el proceso de validación de los datos generados en la anterior y 4) por último se presentan las cartografías de eventos de incendio generadas para el área de estudio global.

4.5.1. Simulaciones

Los resultados de las simulaciones de focos de calor se obtuvieron a partir de considerar tres incendios de superficie conocida distribuidos en la región del Nor-Oeste de la Provincia de Córdoba. La ubicación de los incendios en base a los cuales se realizaron las simulaciones, corresponden a sitios cercanos a la zona de La Fronda, departamento Cruz de Eje, con fecha del 1/10/02 (34600 ha.), La Candelaria, Cruz del Eje, el 12/11/03 (21000 ha.); y en cercanías de Tala Cañada, departamento de Pocho, el 27/11/03 (8197 ha.).

Para la simulación se empleó un modelo de poisson no homogéneo, cuya intensidad (λ) se obtuvo a partir de la información de las superficies conocidas. Tales superficies fueron digitalizadas mediante técnicas de análisis visual utilizando dos imágenes Landsat TM correspondientes a los años 2002 y 2003. El resultado de las superficies quemadas fue codificado en valores de quemado y no quemado (0/1).

El valor de intensidad λ del modelo corresponde al número de puntos que ocurren por unidad de área, controlado por un límite superior (l_{max}). Para nuestro caso, la intensidad es proporcional al valor de los píxeles de la imagen. Dado que la imagen tiene únicamente valores 1y 0 (quemado/no quemado), el resultado de la simulación genera subconjuntos de puntos independientes para ambas clases. De este modo se controló la cantidad de puntos simulados y los límites de la superficie de acuerdo a los perímetros quemados conocidos. En la Figura 24 se presenta a modo de ejemplo el proceso por el cual se controló la intensidad de puntos simulados en dos dimensiones, junto a la estimación de intensidad asociada a cada caso. Las simulaciones corresponden al incendio de La Candelaria.

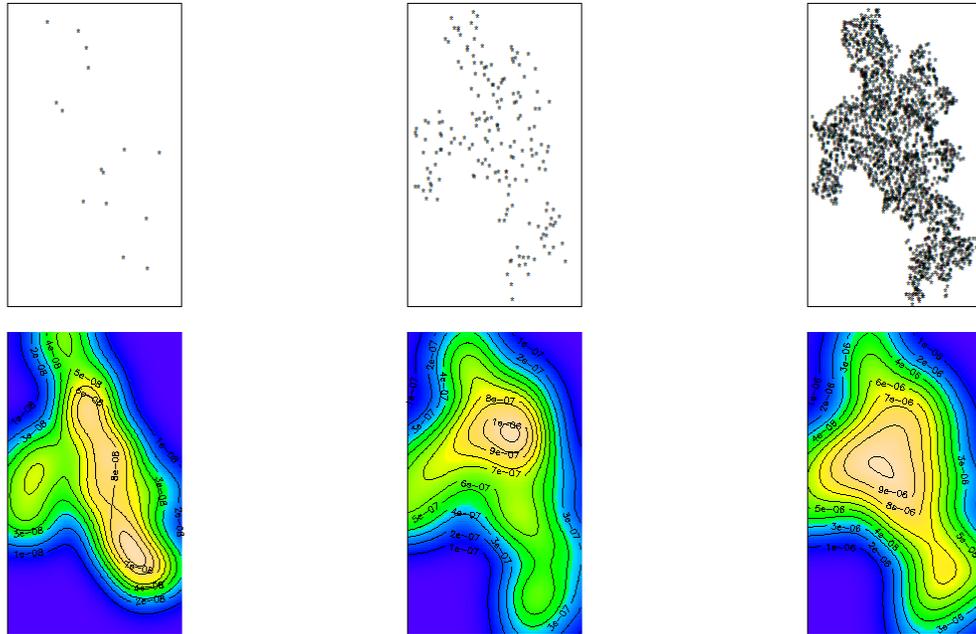


Figura 24: Focos de calor simulados correspondiente al incendio de La Candelaria: Arriba de izquierda a derecha se presentan los resultados de controlar la intensidad λ , ajustada a la forma del perímetro conocido. Abajo, en el mismo orden, se representa la estimación de densidad para cada nivel de intensidad.

Los valores de intensidad fueron seleccionados empíricamente para las tres simulaciones realizadas. Luego, se generaron los resultados correspondientes a: 1) Diagramas de Voronoi, 2) Triangulación de Delaunay, y 3) α -shape.

A continuación se presentan los resultados de los casos estudiados, considerando las etapas de procesamiento involucradas para obtener las superficies quemadas. El primer caso corresponde al incendio de la Fronda. Se trata de un incendio de gran magnitud con una gran variedad de formas intrincadas (Figura 25).

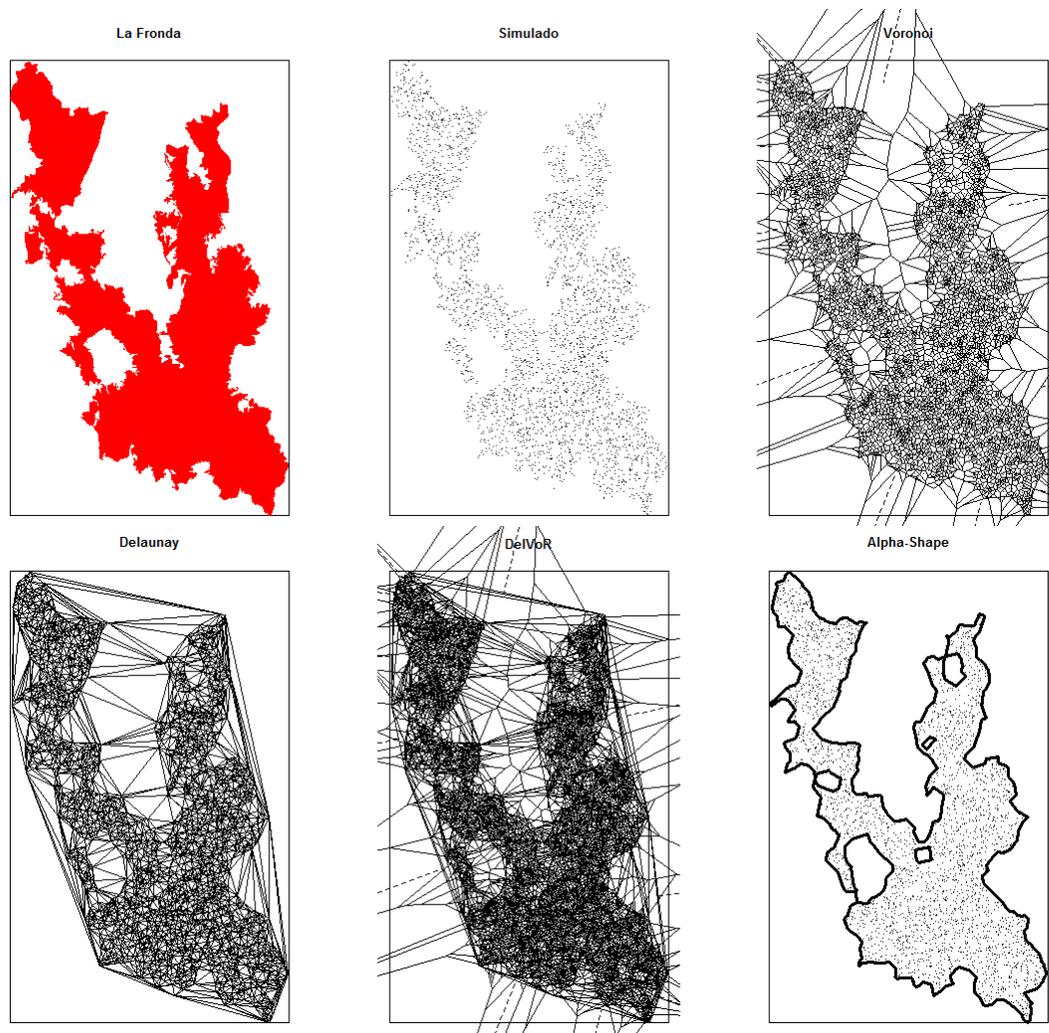


Figura 25: Incendio de La Fronda, 2002. Los tres paneles de arriba indican de izquierda a derecha la superficie conocida, en el centro la simulación y luego el diagrama de Voronoi. Abajo en el mismo orden se presenta la triangulación de Delaunay, la combinación Delunay-Voronoi, y el resultado del estimador de formas α shape.

El incendio correspondiente a La Candelaria es menos complejo en cuanto a formas, pero por su magnitud es representativo del tipo de incendios que ocurren en la región (Figura 26).

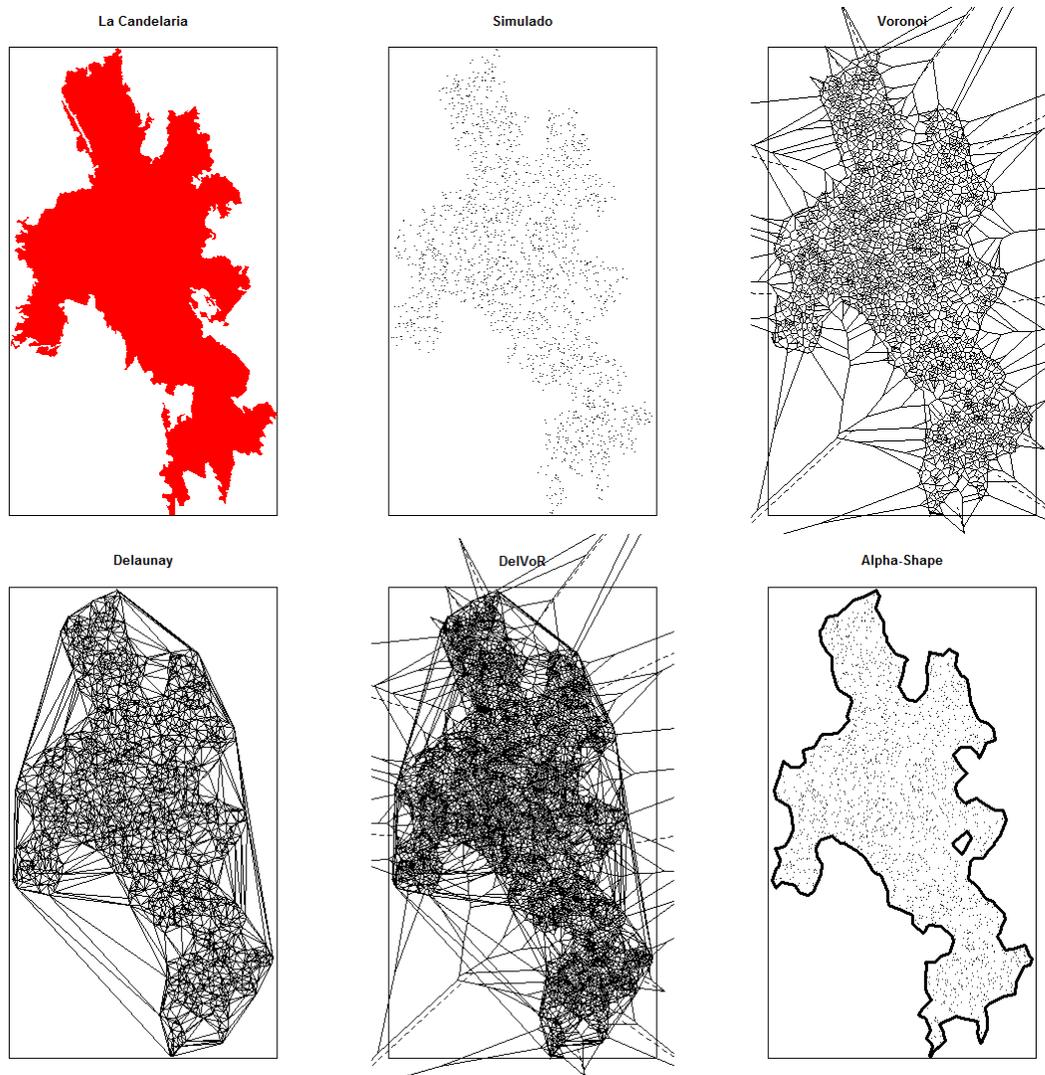


Figura 26: Incendio de La Candelaria, 2003. Los tres paneles de arriba indican de izquierda a derecha la superficie conocida, en el centro la simulación y luego el diagrama de Voronoi. Abajo en el mismo orden se presenta la triangulación de Delaunay, la combinación Delunay-Voronoi, y el resultado del estimador de formas α shape.

Se puede observar como el resultado del estimador α shape logra reconstruir las formas de la superficie conocida para distintos casos, sin mayor intervención humana. El caso que se presenta a continuación es el incendio de Tala Cañada, de menor magnitud, pero también con formas irregulares en sus extremos (Figura 27).



Figura 27: Incendio Tala Cañada, 2003. Los tres paneles de arriba indican de izquierda a derecha la superficie conocida, en el centro la simulación y luego el diagrama de Voronoi. Abajo en el mismo orden se presenta la triangulación de Delaunay, la combinación De Delunay-Voronoi, y el resultado del estimador de formas α shape.

A continuación se presenta la superposición de los resultados obtenidos para cada incendio, junto al dato de la superficie conocida. Se puede observar un alto nivel de correspondencia entre los datos simulados y los datos reales. Esto indica la capacidad de esta metodología para la caracterización de formas y superficies quemadas (Figura 28).

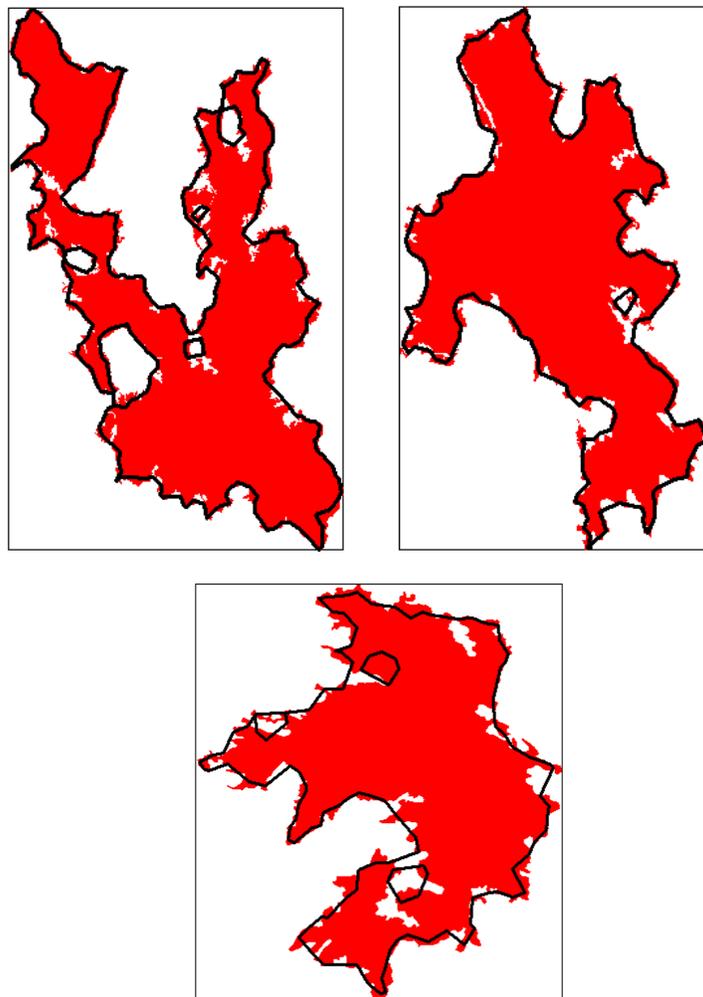


Figura 28: Superposición de los resultados para cada incendio simulado, junto a las superficies conocidas (rojo).

4.5.2. Casos reales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para incendios reales detectados a partir de focos de calor MODIS. La metodología corresponde al esquema planteado en [4.3.3](#), para tres casos específicos. Los casos que se presentan, corresponden a un incendio ocurrido en las Sierras de Comechingones en la Provincia de San Luis, en el año 2009 (~80.000 ha.), un incendio ocurrido en Ascochinga, Provincia de Córdoba el 30/08/2008 (50.000 ha.), y un incendio ocurrido en Brasil, en la zona fronteriza del norte de Paraguay, de fecha y dimensión desconocida. En la figura 29 se puede observar en el panel superior izquierdo, la superficie quemada de referencia y contiguamente en los siguientes paneles, el proceso planteado por etapas.

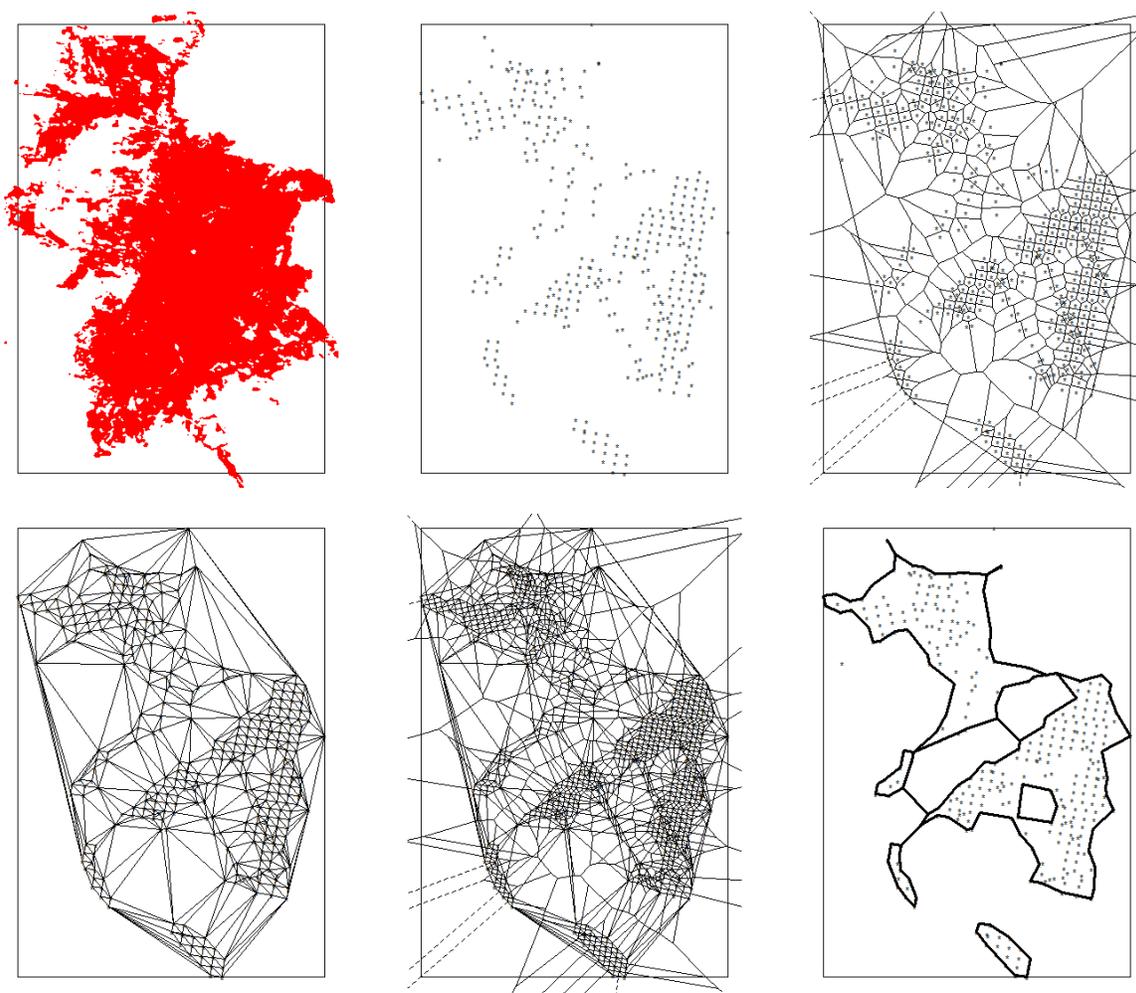


Figura 29: Incendio en San Luis.

Se observa para el resultado de San Luis, una importante cantidad de islas sin datos, lo cual impacta sobre la densidad necesaria de focos de calor para caracterizar el evento completamente. Las islas, corresponden en este caso a los momentos del incendio que no hubo detección, como consecuencia del tiempo de revisita, de la nubosidad ó fallas presentes en las imágenes MODIS. Este es un muy buen ejemplo sobre las limitaciones que presenta el uso de focos de calor para el propósito de detectar superficies quemadas. No obstante se destaca que para las zonas donde si hubo detección, las formas son bien detectadas, en comparación con la superficie de referencia conocida.

Este caso, revela sobre la importancia que juega el numero de focos de calor detectados, y en consecuencia sobre la densidad necesaria de focos, para lograr mejores estimaciones de la superficie y formas de la cicatriz quemada. Además queda evidenciado que la falta de registro

de focos, puede afectar significativamente el resultado. Esta afirmación fue citada anteriormente en [4.3.5.1](#) como uno de los aspectos críticos que determina la imposibilidad de utilizar focos de calor para la estimación de áreas quemadas.

El caso que se presenta a continuación, corresponde al caso de Brasil, y es al contrario, un buen ejemplo donde queda demostrado como afecta positivamente la gran cantidad de focos detectados sobre el resultado final del proceso (Figura 30).

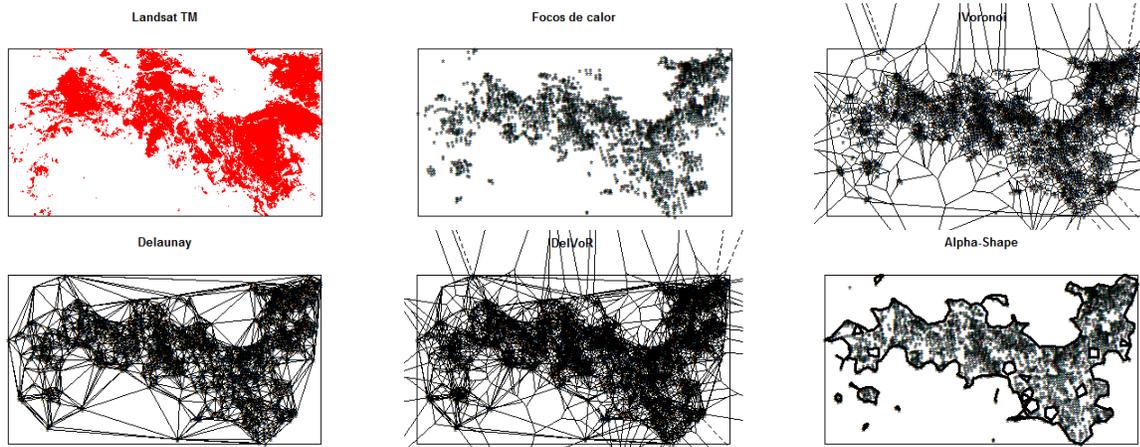


Figura 30: Incendio en Brasil.

El caso de Brasil de la figura 30, corresponde al evento de mayor magnitud detectado para la serie de eventos procesados en el año 2007 para toda el área de estudio ([ver 4.4.4](#)). Queda evidenciado a partir de este resultado, como mejoran las estimaciones de superficie quemada en relación al número de focos de calor detectados. Se deduce de este caso además, que dada la cantidad de focos de calor detectados, puede haber sido un incendio con una tasa de propagación muy elevada y de varios días, lo cual puede estar asociado a prácticas agrícola ganaderas.

Otro caso que pone en evidencia los buenos resultados de esta metodología, es el caso del incendio detectado en Ascochinga. Se trata de un incendio de 5 días de duración, donde se quemaron principalmente pastizales de montaña, y en menor medida, abástaes y bosques nativos (com. pers). Este caso tiene la particularidad, de presentar situaciones antagónicas respecto a la construcción de las formas, y en particular sobre la caracterización de las islas internas. Por un lado, se puede observar de acuerdo a la figura 31 en su panel superior izquierdo, que existen islas bien definidas principalmente distribuidas en la parte central del incendio, y que comparando el resultado final en la misma figura en el panel inferior derecho, no logra detectarlas. Por otro lado, se pueden observar pequeñas zonas del incendio donde no hubo detección de focos, pero que de acuerdo al estimador de formas fueron apropiadamente cubiertas. Esta situación en cuanto a lo que la forma estimada registra de más o de menos, es lo que en la próxima parte de los resultados, se presentan como resultados de validación ([4.4.3](#)).

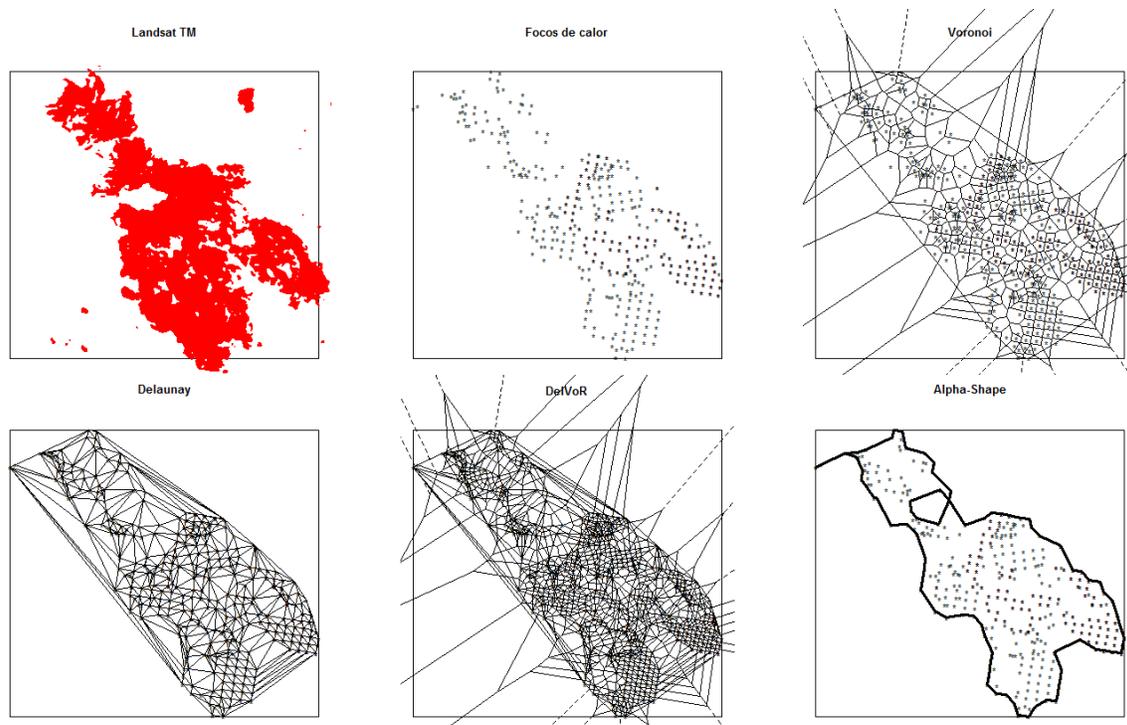


Figura 31: Incendio en Ascochinga, Córdoba.

4.5.3. Validación

El proceso de validación llevado a cabo, tuvo como referencia trabajos de validación de áreas quemadas [17], [88], [98], [110] realizados a distintas escalas geográficas. La idea fundamental del proceso de validación fue utilizar imágenes ópticas de mayor resolución espacial empleadas como “verdad de campo” para ser comparadas cuantitativamente con los resultados obtenidos en este trabajo, y de este modo obtener una medida de la fiabilidad del producto desarrollado. Existen muchos trabajos publicados en donde se emplea este método, y en los cuales se especifican las precauciones a tener en cuenta, especialmente en cuanto al procesamiento de los datos de referencia, consideraciones en cuanto a la fecha de adquisición y la resolución espacial. En este trabajo se emplearon 9 imágenes Landsat TM y 1 imágenes CBERS (4.3.2), que fueron distribuidas en el área de estudio de acuerdo a las regiones donde se observaron incendios de diversas formas y tamaños (Figura 32). Las imágenes se seleccionaron dentro de la ventana temporal correspondiente a la ocurrencia de los eventos a validar, minimizando la distancia de tiempo al evento y seleccionando escenas de baja nubosidad. La validación se llevó a cabo sobre la superficie total correspondiente a cada ventana (Path/Row) seleccionada, excepto para un sitio localizado en Tucumán (231/079), donde solo se validaron las quemas correspondientes a cultivos de caña de azúcar. Las imágenes de referencia fueron clasificadas en áreas quemadas y no quemadas de acuerdo a una metodología mixta que involucra el uso de índices espectrales de área quemada e interpretación visual [88], [111–113] (Figura 34).

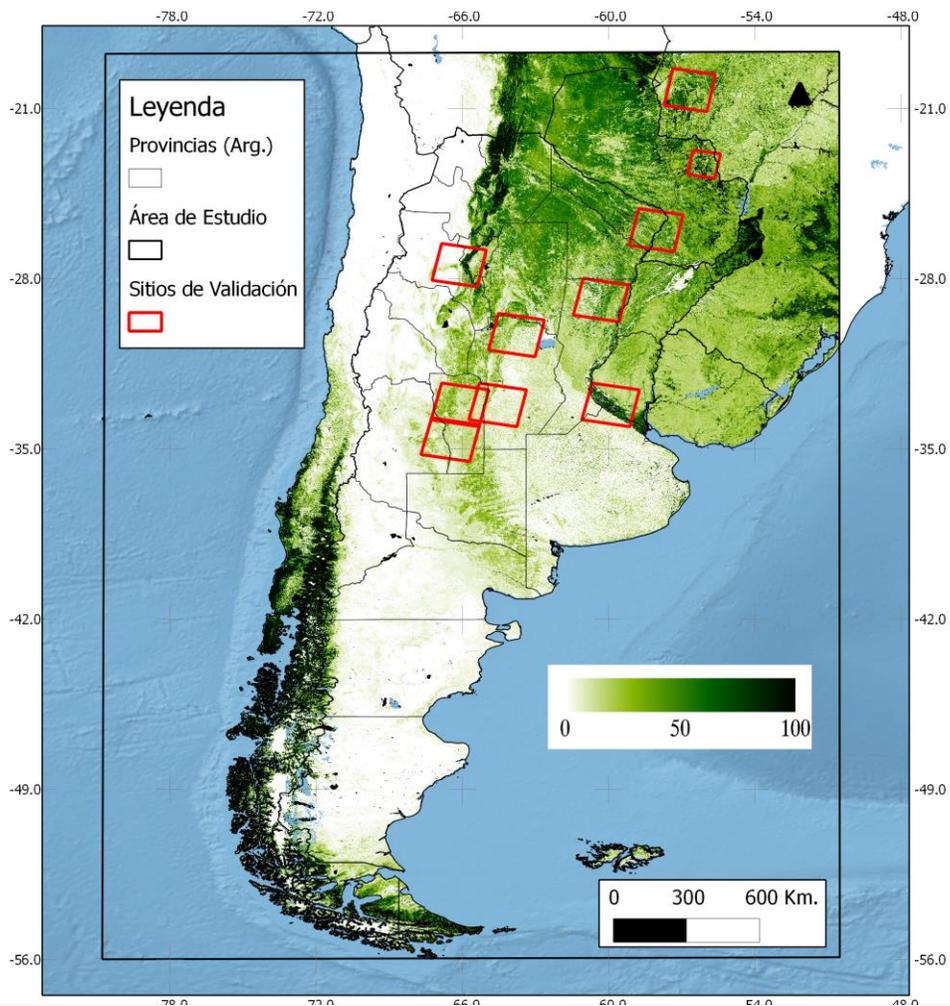


Figura 32: Sitios de Validación distribuidos sobre el Área de estudio. La escala de tonos verdes corresponde a la cobertura de árboles (Vegetation Continuous Fields).

La localización y distribución de los sitios de validación intentó ser representativa de los distintos niveles de combustibles expresados como la proporción de cobertura de árboles. Esto, fundamentalmente asociado a la presencia de distintos tipos de incendios. Además, la selección de sitios busco ser representativa de las distintas regiones de ocurrencia de incendios, de modo de poder lograr obtener precisiones de la fiabilidad del producto de eventos de incendio a nivel local.

Los resultados de la validación fueron obtenidos a partir de matrices de confusión generadas para cada sitio seleccionado. Las matrices se construyeron considerando las clases quemado y no quemado de los datos de referencia, versus los datos del producto de eventos de incendio. Las clases de referencia se ordenaron en las columnas y las clases a validar en las filas de matrices de 2 x 2 (Figura 33).

		Datos de Referencia	
		Quemado	No Quemado
Datos clasificados	Quemado	a	b
	No Quemado	c	d

a	Aciertos quemados
b	Áreas falsamente detectadas
c	Áreas quemadas de referencia no detectadas
d	Aciertos no quemados
a+b	Áreas quemadas detectadas por la clasificación
a+c	Áreas quemadas de referencia

Figura 33: Matriz de Confusión de las clases quemadas y no quemadas, junto a su interpretación.

Los aciertos y los errores del producto se cuantificaron a partir de un conjunto de puntos de validación aleatorios ($n=150$), generados sobre cada una de las imágenes de referencia y contrastados con las imágenes del producto clasificado. Los valores de la diagonal de la matriz (a y d) corresponden a los aciertos, mientras que los valores de los cuadrantes marginales (b y c) corresponden a los errores. A partir de estos datos se establecieron los indicadores de fiabilidad del usuario, y fiabilidad del productor para la categoría quemado (FU_q y FP_q) [88].

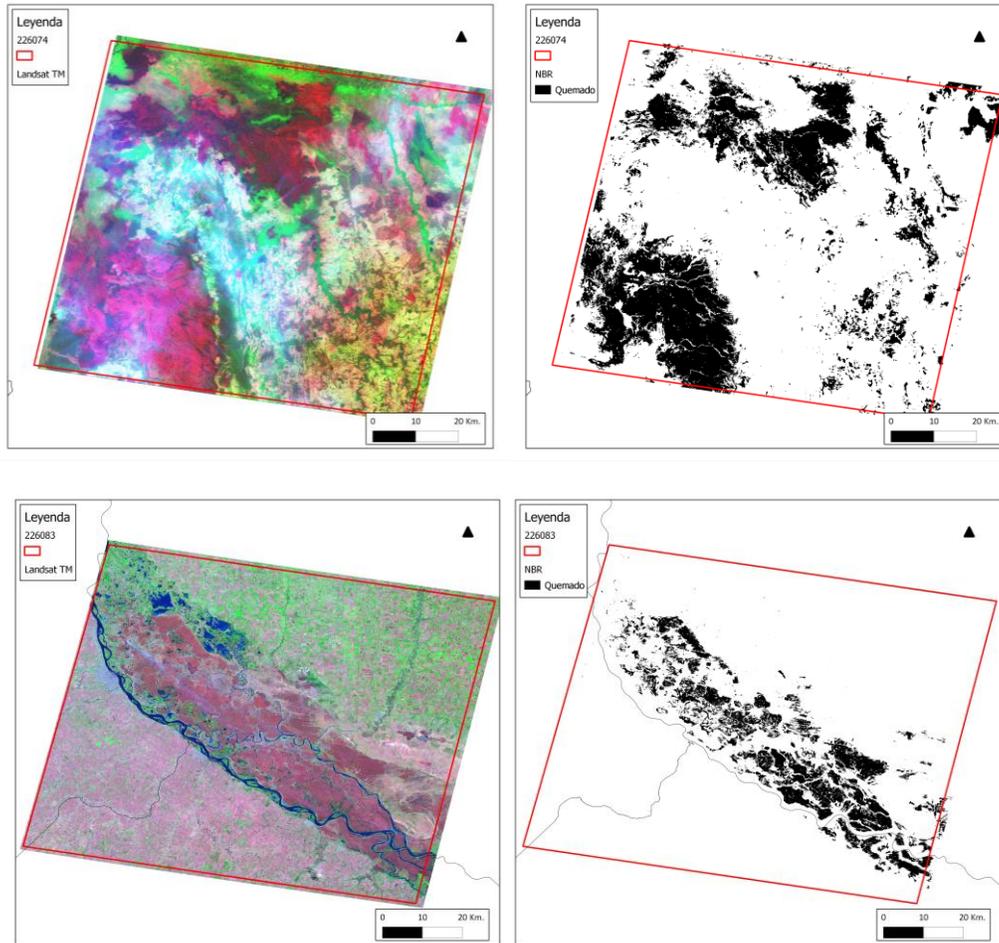


Figura 34: Arriba a la izquierda se presenta la composición en falso color de una imagen Landsat correspondiente al sitio de la ventana 226/074 en Brasil (RGB 7 4 3). A su derecha, el resultado de clasificar las áreas quemadas representadas en negro. Abajo la misma interpretación para el sitio correspondiente a la ventana 226/083 en el Delta del Paraná

En las imágenes de la figura 34 se puede observar a modo de ejemplo, el resultado de la clasificación de áreas quemadas empleadas como referencia en este trabajo. El método empleado puede referenciarse a los trabajos realizados por [18], en donde se especifican las características del índice espectral de área quemada conocido como “Normalized Burned Ratio” (NBR).

La fiabilidad del usuario calculada es una medida relacionada a los errores de comisión. Se interpreta como la proporción de áreas quemadas detectadas por el método de clasificación que son acertadas de acuerdo a los datos de referencia. La fiabilidad del productor, se la relaciona a los errores de omisión y corresponde a la proporción de los datos de referencia que son acertados de acuerdo a los datos obtenidos en la clasificación. Errores de comisión lo representan las fracciones de la clase **quemado** que son registradas por el producto, pero que

no están en los datos de referencia, y a los errores de omisión entendemos lo representan las clases quemadas presentes en los datos de referencia, que no fueron detectados por el producto.

$$FU_q = \frac{a}{a+b} ; EC_q = 1 - FU_q = \frac{b}{a+b}$$

$$FP_q = \frac{a}{a+c} ; EO_q = 1 - FP_q = \frac{c}{a+c}$$

El mismo análisis se realizó para la clase no quemado, donde la fiabilidad del usuario (FU_{nq}) indica la proporción de las clases no quemadas que son acertadas por la clasificación de acuerdo a los datos de referencia, y la fiabilidad del productor (FP_{nq}) indica la proporción de la clase no quemada de los datos de referencia que son acertados de acuerdo a los resultados obtenidos por la clasificación.

$$FU_{nq} = \frac{c}{d+c} ; EC_{nq} = 1 - FU_{nq} = \frac{d}{d+c}$$

$$FP_{nq} = \frac{d}{d+b} ; EO_{nq} = 1 - FP_{nq} = \frac{b}{d+b}$$

La valoración global de los resultados para cada sitio de validación se obtuvo a partir de calcular la relación entre el número de muestras correctamente asignadas y el total. Este es un parámetro normalmente llamado de Fiabilidad Global (FG).

$$FG = \frac{a+d}{a+b+c+d}$$

Se procedió a calcular el coeficiente kappa para cada uno de los sitios de validación, el cual proporciona una medida estándar sobre la precisión de la clasificación, en base al cálculo de la

diferencia que existe entre los aciertos obtenidos por los datos de referencia y de la clasificación, y los aciertos que sucederían por azar.

$$Kappa = \frac{P(o) - P(e)}{1 - P(e)}$$

$$P(o) = \frac{(a + d)}{(a + b + c + d)}; P(e) = \frac{(a + c)(a + b)(b + c)(b + d)}{(a + b + c + d)^2}$$

Donde $P(o)$ es la proporción de aciertos observados, y $P(e)$ es la proporción de aciertos esperados por azar.

Los eventos de incendio que fueron interceptados por las ventanas correspondientes a los sitios de validación seleccionados, se presentan a continuación en la figura 36. Los eventos quemados se presentan en rojo y superpuestos a los eventos se presentan los focos de calor como puntos negros. Cada cuadrante corresponde a los Path/Rows de las imágenes Landsat y CBERS, y están ordenados de arriba hacia abajo comenzando en el cuadrante superior izquierdo. El ordenamiento no sigue una lógica geográfica, sino una orden respecto a las tablas y gráficos generados en los cuales se presentan los errores de omisión, errores de comisión y fiabilidad global (Figura 35) y el coeficiente kappa (Figura 38).

Sitio	#	Sensor	Path/Row	Fecha	FU	FP	FG	Kappa	EC	EO
Paraguay	1	CBERS	164/126	15/08/2007	48.39%	53.57%	75.83%	0.35	51.61	46.43
San Luis 1	2	TM	229/083	27/08/2009	94.12%	45.71%	79.59%	0.50	5.88	54.29
San Luis 2	3	TM	230/083	19/09/2009 - 05/10/09 - 21/10/09	66.67%	33.33%	95.28%	0.42	33.33	66.67
San Luis 3	4	TM	230/084	06/11/2009	83.33%	71.43%	96.77%	0.75	16.67	28.57
Tucuman	5	TM	231/079	Julio/Agosto/sept/Oct/2009 *	14.29%	33.33%	86.89%	0.14	85.71	66.67
Córdoba	6	TM	229/081	09/09/2008	60.00%	42.86%	95.28%	0.48	40.00	57.14
Paraguay	7	TM	226/078	02/05/2009	41.67%	83.33%	93.10%	0.52	58.33	16.67
Santa Fe	8	TM	227/080	08/08/2007	63.64%	35.00%	85.47%	0.38	36.36	65.00
Entre Rios	9	TM	226/083	10/06/2008	70.00%	53.85%	95.31%	0.58	30.00	46.15
Brasil	10	TM	226/074	04/10/2007	88.46%	47.92%	85.42%	0.54	11.54	52.08

Tabla 24: Resultados generales de la validación del producto MoDIIA_p2

* Información provista por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Tucumán. EEA Famaillá).

La tabla 24 presenta los resultados generales para cada uno de los sitios de validación. Considerando a la *FG*, se puede observar que los mejores resultados se concentran respectivamente para las ventanas ubicadas en San Luis 2, Córdoba, Entre ríos y San Luis 3 (230/083, 229/081, 226/083 y 230/084), con valores cercanos al 95% de fiabilidad. En contraste, los valores más bajos corresponden a los sitios ubicados en Paraguay (164/126) y San Luis1 (229/083) con valores entre el 75 y 80% de *FG* (figura 35). El mayor valor correspondiente a errores de comisión, es decir las fracciones de la clase quemado que no fueron verificadas por los datos de referencia, se verificó para el sitio de Tucumán (231/079) con un valor del 85.71%. Este sitio corresponde específicamente a la validación de este producto sobre quemas de cultivos de cañas de azúcar. Las quemas sobre lotes de cultivo pequeños puede dificultar la capacidad de detección de los focos, además de los cortos periodos de quemas no registrados, para este caso por MODIS. El producto de eventos, como se precisó en la metodología, depende entre otras cosas de la distancia que existe entre los focos de calor detectados. Considerando una baja densidad de focos, se deducen mayores distancias, lo que tiene como resultado la triangulación de focos distantes entre sí. Esto puede generar formas exageradas que sobreestiman la superficie real quemada. Por ello que se verifica para el caso de Tucumán errores de comisión tan elevados (Ver cuadrante 231/079 de la figura 36).

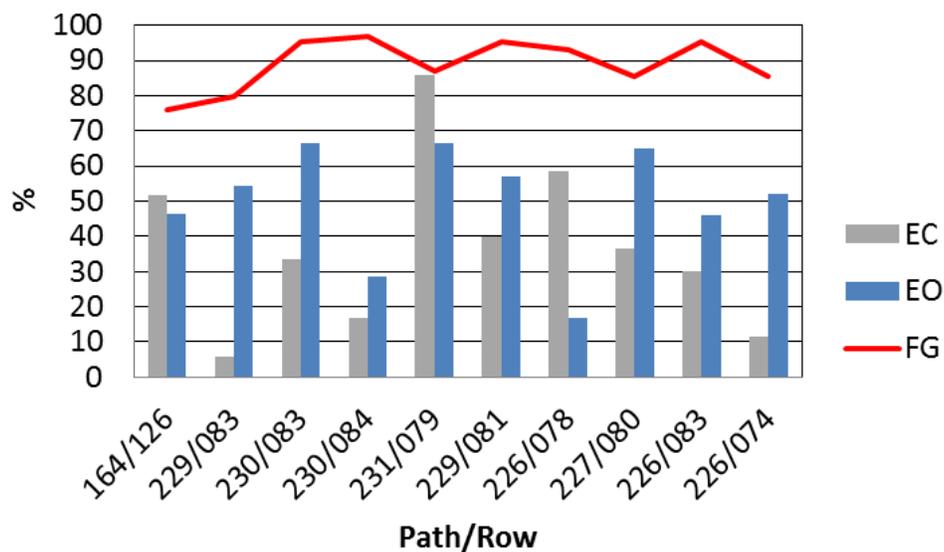


Figura 35: Errores de comisión (EC), errores de omisión (EO) y fiabilidad global (FG) para cada uno de los sitios validados.

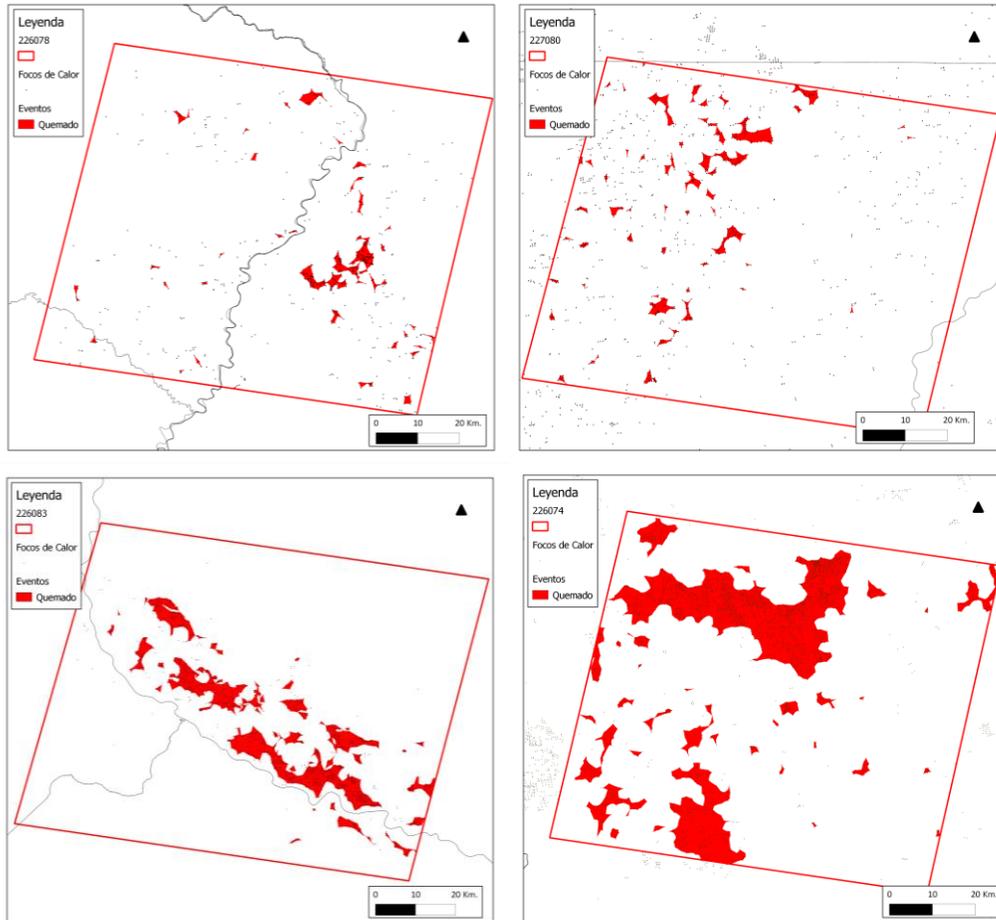


Figura 36: Se presentan los eventos de incendios validados correspondientes a cada uno de los sitios de validación. En rojo se observa el resultado del producto, y en puntos negros los focos de calor.

Los sitios que presentaron los menores errores de comisión del análisis, corresponden a las ventanas ubicadas en San Luis 1 (229/083,) y Brasil (226/074) con 5.88% y 11.54% respectivamente. Estos resultados indican una buena asimilación de las formas detectadas por el producto en relación a los datos de referencia. Los valores de EC para San Luis 1, no difieren en promedio del resto de los sitios aledaños (~20%), es decir sobre los sitios de San Luis 2 y 3, lo cual estaría indicando que la zona en general tiene un patrón de comportamiento uniforme en cuanto a los EC (figura 37).

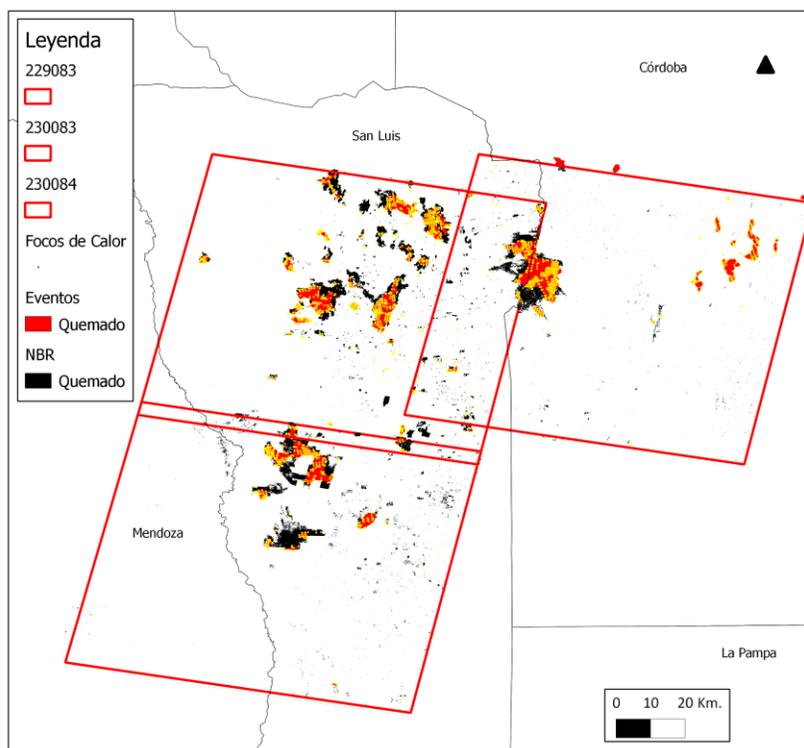


Figura 37: Cuadrantes de validación correspondientes a los sitios de San Luis.

Tomando en cuenta a los 10 sitios validados conjuntamente, se calculó en promedio un valor de error de comisión del 36.94%.

Considerando los errores de omisión, o sea aquellos errores debidos a la sub estimación de las superficies quemadas, se observan para todos los sitios conjuntamente un valor promedio de 49.97%. El valor más alto de EO registrado es de 66.67% y corresponde a los sitios de Tucumán (231/079) y con el mismo valor para San Luis 2 (230/083). El caso de Tucumán como fue descrito anteriormente, corresponde a las quemas de caña de azucar, con los inconvenientes en cuanto a la baja densidad de focos de calor, y el tamaño de las quemas. El valor mas alto de EC que le sigue corresponde al sitio ubicado en Santa Fé (227/080) con 65%. Este sitio corresponde a una zona de quema de pastizales dedicada al pastoreo de ganado vacuno. De acuerdo a las observaciones interanuales de focos de calor, esta zona es quemada mas de una vez al año persiguiendo el objetivo de obtener forraje palatable para el ganado. Dado que las quemas de pastizales son rápidas y por ello frecuentemente no son detectadas por MODIS, es posible que no halla habido el suficiente registro de focos para lograr caracterizar los eventos de incendio. Pasando a los errores de omisión mas chicos, el sitio que corresponde a la ventana 226/078 ubicada en Paraguay, presentó un 16.67% de error.

Los valores del coeficiente kappa tienen un comportamiento que varía para todos los sitios entre 0.10 y 0.60 a excepción de dos casos, uno de máxima que corresponde al sitio de San Luis

3(230/084) con un valor de 0.75, y uno de mínima que corresponde al sitio de Tucumán (231/079) con un valor de 0.14 (figura 38). El promedio del coeficiente kappa para todos los sitios analizados es de 0.47.

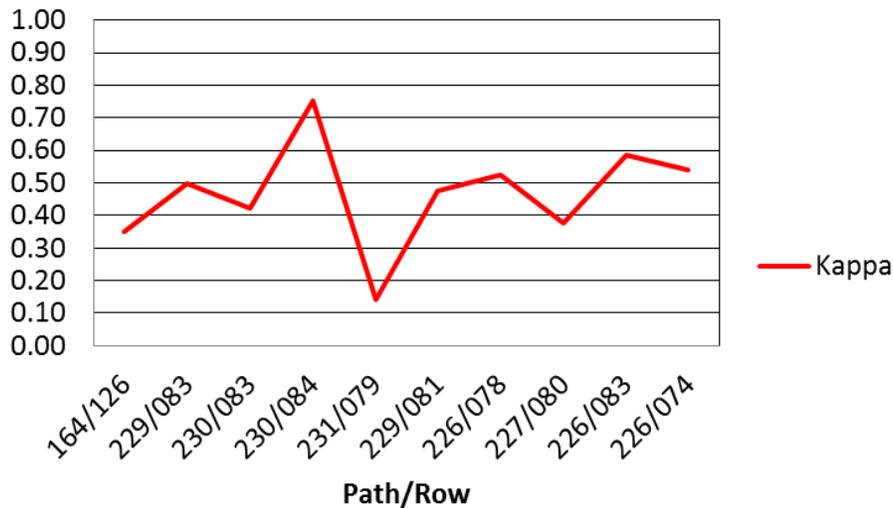


Figura 38: Coeficiente kappa para cada uno de los sitios validados.

4.5.4. Cartografías

En este apartado final del capítulo se presentan los resultados de las cartografías realizadas, comprendidas para toda el área de estudio entre los años 2007 y 2010. En la figura 39 se observan en distintos colores los diversos patrones de ocurrencia de eventos de incendios para los años procesados. Se destacan distintas zonas con mayor densidad de eventos que son detectados en los 4 años de estudio, indicando la recurrencia del uso del fuego, como por ejemplo las zonas del interior de la Provincia de Santiago del Estero y Formosa. Muchos de los eventos aquí registrados son la evidencia de procesos de cambio de uso del suelo relacionados por ejemplo a la expansión de la frontera agrícola. Además se pueden observar eventos destacables, como lo es el caso del incendio ocurrido en abril del 2008 en el Delta del Paraná, donde se observa prácticamente gran parte de la superficie deltaica cubierta por eventos de incendios. Otro ejemplo destacable es la región serrana de la Provincia de Córdoba y San Luis. Esta zona ha sido ampliamente estudiada por diversos autores, donde la ocurrencia de incendios responde a una forma de cuña que inicia en la Provincia de La Pampa y se extiende hacia los límites del norte de Córdoba, coincidiendo con las formaciones de vegetación correspondientes al Espinal y al Chaco Serrano y Seco en contacto con el mosaico agrícola de la región pampeana. Esta zona central no se destaca por ser un sector de frecuencia anual, pero sí de ocurrencia interanual. Otra región dentro del territorio nacional con un alto nivel de ocurrencia de eventos de incendios, es la zona de cultivos de caña de azúcar en Tucumán. En este caso cabe la distinción entre incendios y quemadas, en particular, quemadas agrícolas.

Observando el territorio paraguayo, es posible observar una alta frecuencia de eventos de incendio para el año 2007, que de acuerdo a las estadísticas oficiales de ese país, corresponde al año histórico con mayores eventos registrados. En la figura 40 se presentan las cartografías generadas por separado con la idea de poder observar la distribución de los eventos de manera individual para cada año.

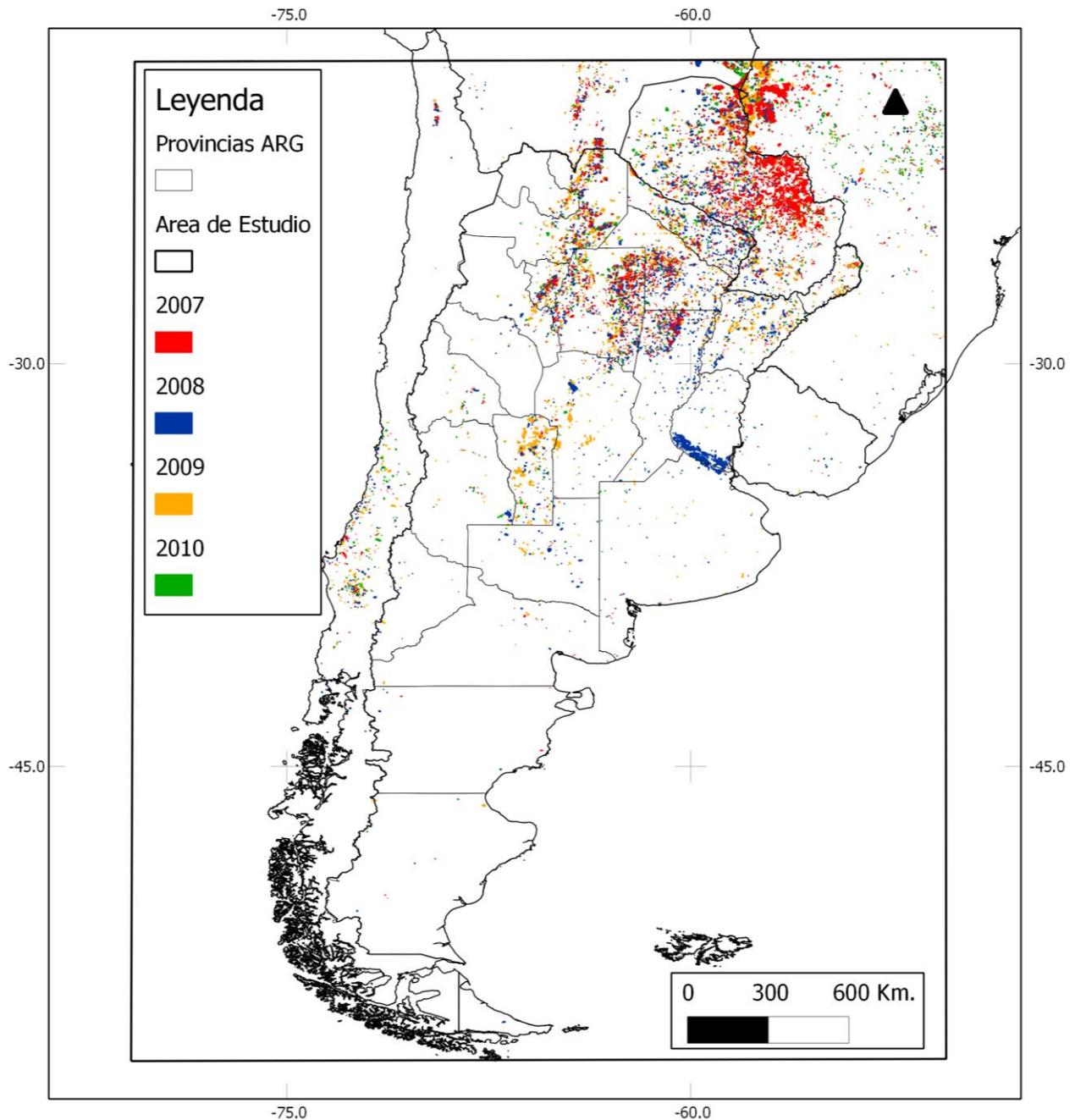


Figura 39: Distribución de eventos de incendios para los años 2007 (rojo), 2008 (azul), 2009 (naranja), y 2010 (verde).

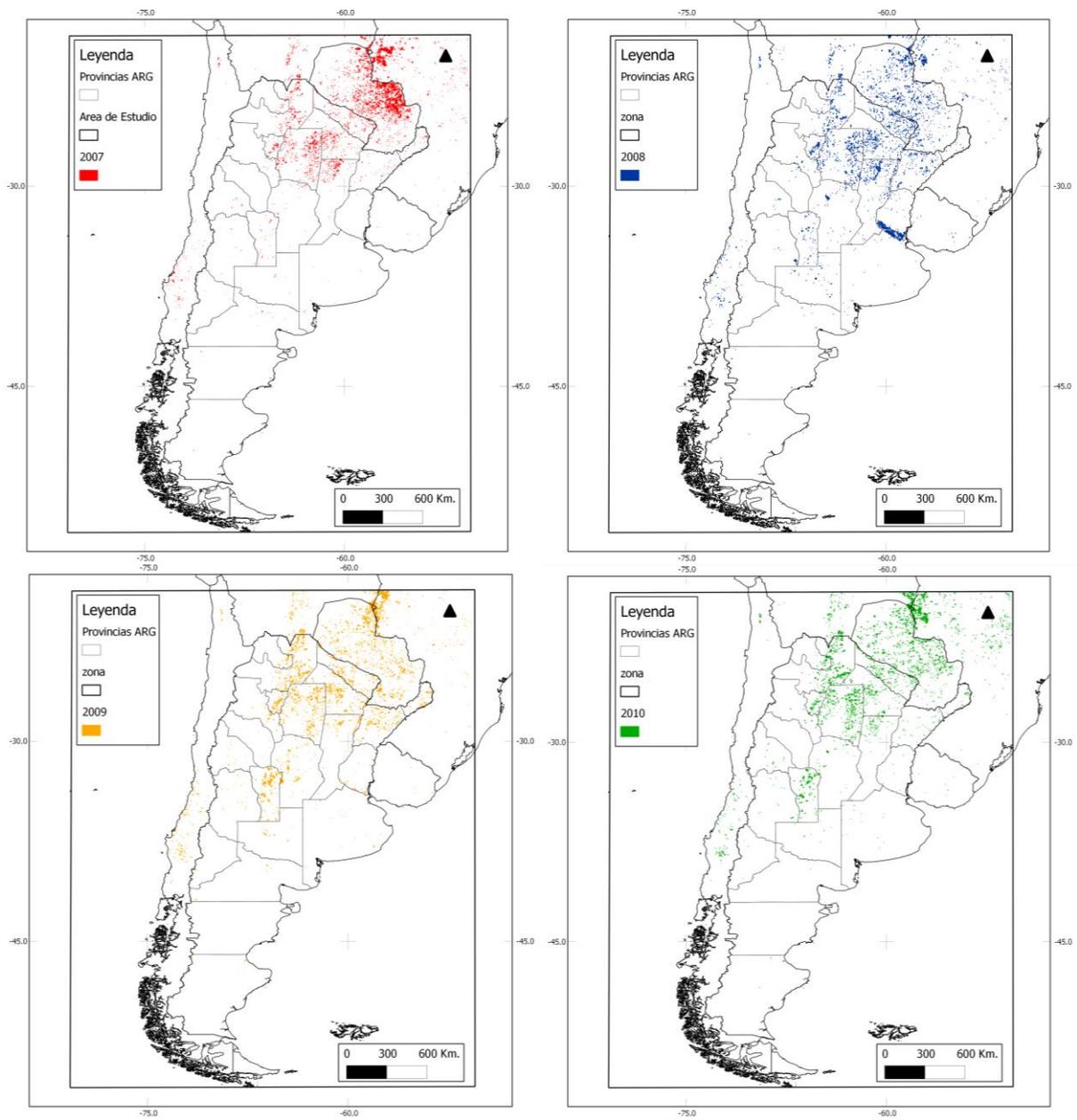


Figura 40: Ubicación geográfica de eventos de incendios para los años 2007, 2008, 2009 y 2010 en Argentina.

4.6. Conclusiones y Discusión

El concepto central de esta aplicación fue la de optimizar la utilización de focos de calor, hacia un uso más efectivo, entendiendo que la localización espacial de focos asilados no provee suficiente información para caracterizar un evento de incendio, en cambio la formación provista por estructuras poligonales, si es representativa de un evento como tal.

En este capítulo se desarrolló una metodología que a partir de utilizar focos de calor como entrada, genera en forma automática un producto de *eventos de incendios*. La propuesta aquí planteada forma parte del Módulo de detección e identificación de fuego activo (MoDIIA), proyectado como parte del sistema de alerta y respuesta temprana a incendios de vegetación presentado en esta tesis.

El algoritmo desarrollado consiste en un proceso de tres etapas principales, donde en primer lugar se identifican sub conjuntos de focos de calor aglomerados y dispersos, clasificándolos de acuerdo a reglas de distancia en clases “cluster” y residuos. A continuación, en una segunda etapa, y tomando únicamente el subconjunto de focos cluster, se aplican herramientas de geometría computacional para generar estructuras que delimiten los cluster clasificados. Posteriormente en una tercera fase, se emplea un estimador de formas que determina de acuerdo a las estructuras generadas en la fase anterior, una sub estructura externa, que resulta en el perímetro final del evento de incendio. La primera fase del algoritmo se basó en una función de distancia al vecino más cercano desarrollado por [87]. Ésta metodología, fue pensada para descartar, en un proceso de puntos, aquella información que no responde a un patrón aglomerado, y que por lo contrario se clasifica como residuos. En estos términos, la limpieza nos permitió para esta aplicación, descartar los focos de calor asilados que por lo general no corresponden a incendios. Las herramientas de geometría computacional de la segunda fase, consisten en la triangulación de Delaunay y los diagramas de Voronoi. Ambas herramientas conjuntamente, permitieron determinar la formación de estructuras formadas a partir de los focos de calor aglomerados. Estas estructuras, basadas en una serie de reglas de cómputo, conforman una red polígonos que permiten delimitar las diversas formas que surgen como consecuencia de la variedad de aglomeraciones de focos. A continuación, en base a las estructuras formadas, se empleó un estimador de formas que corresponde a una variante del casco convexo. Este estimador llamado α -Shape, tiene la particularidad de poder intervenir sobre la asimilación de las formas, mediante el ajuste de un parámetro derivado de las distancias entre focos de calor [108].

La metodología, que se planteó en este capítulo fue implementado en el ambiente R, empleando diversos paquetes y funcionalidades. Inicialmente se planeó la necesidad de lograr un proceso con una mínima intervención humana, lo cual pudo ser llevado a cabo. Esto es importante, por el hecho de poder significar un paso significativo hacia la posible incorporación de este tipo de productos, dentro de la cadena de producción de datos de CONAE.

Los resultados obtenidos son en general los esperados de acuerdo a las limitaciones que impone la utilización de focos de calor aplicados a la estimación de superficies quemadas. A lo largo del capítulo quedan claras todas estas limitaciones de acuerdo a la diversidad de los trabajos citados. El proceso de validación realizado intentó ser lo más representativo posible de la región de estudio y en particular sobre las distintas regiones con mayor afectación de incendios.

Capítulo V

5. Desarrollo de una aplicación orientada a la predicción del Peligro de propagación de incendios

MÓDULO de Peligrosidad y Riesgo de incendio (MoPRI)

Producto: Índice de Peligro de Propagación (MoPRI_p8)

5.1. Resumen

El desarrollo del presente producto apunta a demostrar la importancia de incorporar simulaciones dinámicas de incendios a las estimaciones de riesgo convencionales. La idea fundamental, es poner a prueba el efecto de un simulador de incendios en la estimación de peligro de propagación que a partir de un mínimo de características del territorio, modele las condiciones de propagación de incendios. De acuerdo a las definiciones adoptadas para este trabajo de tesis, la simulación de la propagación de incendios se enmarca bajo el concepto de peligro de propagación. En este capítulo se presenta un simulador prototipo diseñado en IDL, basado en un modelo de Autómata Celular (AC). Los AC son sistemas dinámicos discretos que operan en el espacio y el tiempo, sobre una grilla de píxeles uniforme y regular, en la cual cada píxel puede tomar un valor a partir de un conjunto finito de estados k , y funciones de transición locales [114]. Como fue indicado en la definición del producto ([ver MoPRI p8](#)), el índice de propagación considera dos aspectos relacionados al riesgo: El peligro de ignición y las condiciones de los combustibles. El primero se estima como una asociación a la cercanía de actividades humanas, y el segundo considera al estado de los combustibles, asociado a la probabilidad de que un frente de incendio se propague sobre la superficie. Mediante esta aproximación, la cual contempla no solo el estado individual de un píxel, sino también considera la relación espacial existente entre ellos, se busca establecer cómo influye el “costo” de arribo de un incendio a determinado lugar, de acuerdo a las condiciones de riesgo existentes. Las simulaciones se llevaron a cabo sobre un área piloto ubicada sobre el PNQC.

5.2. Introducción

El uso de simulaciones de incendios dentro del análisis de riesgo no es un concepto nuevo [23]. Sin embargo, su empleo dentro de sistemas operacionales de estimación de riesgo no es común, fundamentalmente por la complejidad que implica reunir la diversidad de datos de entrada necesarios para correr un modelo de propagación. Por lo general, los simuladores de incendios son empleados para predecir el comportamiento del fuego y determinar el crecimiento de un incendio dado [115], siendo pocos los casos orientados a la estimación de riesgo propiamente dicha. Los índices de riesgo más utilizados a nivel mundial se basan en modelos empíricos, como el índice meteorológico canadiense, por su sigla en inglés, Fire Weather Index (FWI), y también el índice Australiano, Mc Arthur Fire Weather Index (FFDI). Actualmente, la tendencia es el diseño de índices basados en información satelital, construidos empíricamente, o a partir de modelos de transferencia radiativa, con el objetivo de extraer el estado hídrico o senescente de la vegetación [24], [116–118], y correlacionarlo a las condiciones de peligro de incendio [27], [116]. Otras aproximaciones se basan en combinar información provista por modelos de predicción meteorológica con información satelital para obtener una estimación sobre las condiciones de vulnerabilidad de los combustibles de acuerdo a las condiciones de la atmósfera [65], [119].

En general, se reconoce que el concepto en torno al riesgo es interpretado de formas diferentes de acuerdo a la disciplina. Por ello es importante referenciar el marco conceptual considerado en este trabajo de tesis a una misma base de conocimiento y vocabulario. De todas las aplicaciones arriba mencionadas, es poco lo que se ha investigado en la integración de modelos de propagación de incendios a las estimaciones de riesgo tradicionalmente desarrolladas. El concepto es interesante considerando que las condiciones de riesgo de un determinado lugar (pixel) no solo dependen de su propio estado, sino también de las condiciones del entorno. En este sentido, no es lo mismo interpretar la condición de una zona seca con alto índice de riesgo en un entorno aislado, por ejemplo una zona inaccesible o restringida al alcance del fuego, que una zona en las mismas condiciones de riesgo, pero con una alta probabilidad de ignición determinada por su mayor accesibilidad. El concepto parte de la idea que la vulnerabilidad, definida como el daño potencial de determinado elemento del paisaje, no contempla la probabilidad de ignición de un evento. Es evidente, que la probabilidad de ignición de un lugar no es uniforme. Por ello, se considera por definición a la amenaza como una variable relacionada a la probabilidad de ignición. Con estas dos variables, la vulnerabilidad y la amenaza, se compone un índice de riesgo, como una fórmula globalmente aceptada por diversas disciplinas ($R = V \times A$).

La crítica que se plantea sobre este desarrollo, precisa sobre la imposibilidad de poder estimar el riesgo de determinado lugar, únicamente en base a estas estimaciones. La idea que fundamenta esta observación tiene que ver con la importancia de poder incorporar el costo de arribo de un frente de incendio a un lugar vulnerable a quemarse. El costo de arribo, se traduce como la probabilidad de propagación de un frente de incendio entre sitios de mayor amenaza y

sitios de alta vulnerabilidad. Esta nueva idea, poco explorada de acuerdo a la literatura, se enmarca bajo el concepto de peligro de propagación.

Para llevar adelante un índice de peligro de propagación, se propone un enfoque dinámico basado en un simulador simple de AC. El enfoque desarrollado para modelar las condiciones de propagación de incendios, se basó en un proceso discreto de ignición a través de una grilla regular de píxeles. Cada píxel representa una superficie de tamaño fijo que tiene atributos que corresponden a las características de la superficie. La condición inicial del simulador, se basó en la construcción de una capa de amenaza, basada en las características de accesibilidad del territorio, la cual sirvió como indicador de las zonas más propensas a igniciones. La capa correspondiente a la vulnerabilidad se basó en la construcción del índice NDVI, adaptado para representar la distribución espacial de lo que se consideró como pseudo combustibles. El trabajo se desarrolló sobre un área piloto que abarca la ubicación del PNQC. Se ejecutaron 100 simulaciones, incorporando a cada operación 10 focos de ignición distribuidos al azar con 500 pasos de tiempo cada una, lo cual en su conjunto representó simular la ignición de 1000 focos de incendios. A continuación se plantean una serie de preguntas relativas al modelo empleado:

- ¿Qué características de los combustibles, hacen que sean vulnerables a ser quemados más frecuentemente?,
- ¿Cómo afecta la accesibilidad sobre el nivel de peligro de igniciones?
- ¿Cómo afectaría el efecto del viento sobre el riesgo de propagación?
- ¿Cómo afectaría la presencia de un cortafuego sobre la estimación del riesgo de propagación?
- ¿Qué efecto tiene la estimación de riesgo de propagación, sobre una estimación de riesgo convencional?

5.3. Autómatas celulares

Los autómatas celulares son modelos de gran utilidad para representar procesos dinámicos de la naturaleza [122]. Tales modelos pueden enmarcarse dentro de los modelos semi-empíricos. Por definición, los AC son sistemas dinámicos que operan en forma discreta en el espacio y en el tiempo sobre una grilla uniforme y regular caracterizada por interacciones locales [120]. A continuación se presentan las definiciones generales de los AC y sus elementos básicos:

5.3.1. Definiciones generales

El funcionamiento de un AC depende de los siguientes elementos:

- Una grilla de enteros discreta de dimensión finita. Cada celda de la grilla se conoce como célula.
- Cada célula puede tomar un valor a partir de un conjunto finito de estados k .
- Cada célula, además, se caracteriza por su vecindad, como un conjunto finito de células en las cercanías de la misma.
- De acuerdo con esto se aplica a todas las células de la grilla una función de transición (f) que toma como argumentos los valores de las células en cuestión y los valores de sus vecinos, y regresa el nuevo valor que la célula tendrá en la siguiente etapa de tiempo. Esta función f se aplica, de forma homogénea a todas las células por cada paso discreto de tiempo.

5.3.2. Nuestro modelo.

En esta sección se describe en términos técnicos el desarrollo del modelo. Luego, se presenta en forma detallada sus características de acuerdo al vocabulario adoptado para este trabajo:

El modelo se aplica sobre una matriz bi-dimensional de 900 x 900 pixeles con dos pasos de tiempos: $D : bytarr(900,900,2)$

Los posibles estados de cada pixel del dominio se definieron como:

- Encendido: 1
- Apagado: 2

La función de transición que determina el comportamiento del AC utiliza la vecindad de Von Neumann, que consiste en un pixel central $X_{(i,j)}$ $x_{(i,j)}$ y sus vecinos más próximos: $X_{(i,j-1)}$ $x_{(i,j-1)}$, $X_{(i,j+1)}$ $x_{(i,j+1)}$, $X_{(i-1,j)}$ y $X_{(i+1,j)}$ $x_{(i+1,j)}$ [49]. La transición de un pixel encendido hacia un pixel vecino se basa en una función aleatoria con distribución binomial.

Las condiciones iniciales del modelo, se representaron a partir de una matriz de amenaza del mismo tamaño del dominio. La matriz fue creada a partir de un vector que representa los caminos, y accesos (vías de comunicación) del PNQC. Sobre los caminos se calculó una función de distancia, cuyo resultado fue convertido a una matriz raster con un rango de valores de 0 a 1. Los valores más altos indican mayor contacto con las vías de comunicación. Además se simulaban las condiciones de acampe junto a los caminos, quedando representada otra característica relativa al uso humano. Los puntos de ignición se distribuyeron al azar sobre el

dominio, considerando 10 igniciones por corrida de acuerdo a la función de amenaza establecida.

Para determinar la probabilidad de que un pixel sea encendido (estado 1) o apagado (estado 2), se construyó una matriz a partir del cálculo de NDVI con un rango de valores de 0 a 1, que la denominamos matriz de bondad. A mayor bondad mayor es la probabilidad de que un pixel se encienda. Esta matriz corresponde al concepto de pseudo combustibles anteriormente mencionado. Las matrices de amenaza y de bondad para el caso de un funcionamiento operativo deberían provenir de los productos correspondientes al índice de amenaza (MoPRI_p1) y al índice peligrosidad de la vegetación (MoPRI_p3). En el contexto de este capítulo esos productos han sido calculados de una manera simplificada para estudiar el proceso dinámico, y de ninguna manera pretende reflejar un caso real.

Por otro lado, se construyeron dos matrices para representar el efecto del viento. La primera representa un viento con dirección este oeste, y la segunda equivale a vientos con dirección norte sur. Por lo tanto, la aplicación de ambas matrices, resultan en vientos provenientes del sector Nor-oeste, equivalente a las condiciones de los vientos predominantes de las sierras donde se ubica el PNQC. Adicionalmente se construyó una matriz para presentar el efecto de un cortafuego. La matriz corresponde a una máscara aplicada sobre la matriz bondad original, es decir una franja de pixeles con valores = 0, ubicados en un sitio arbitrario.

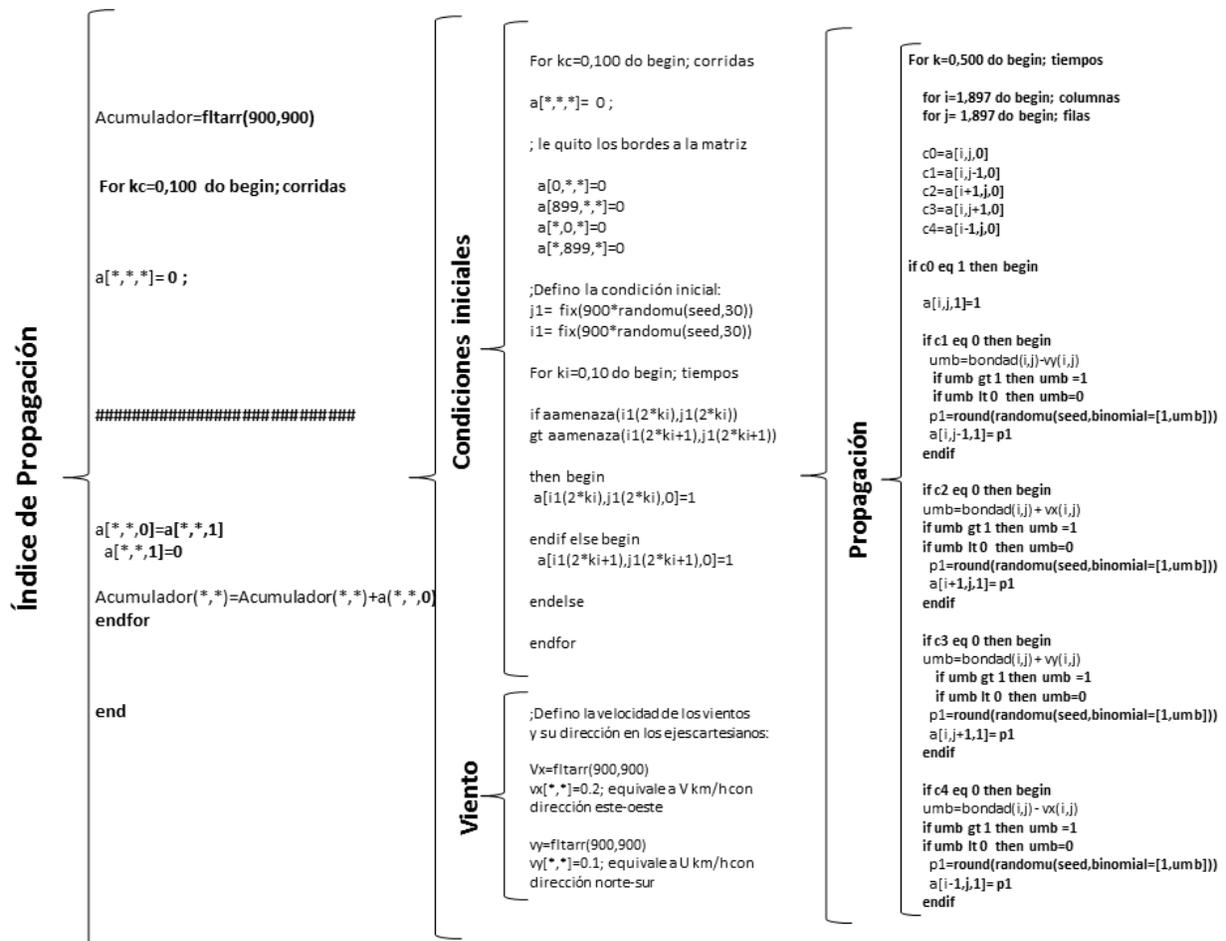


Figura 41: Pseudo código de la aplicación implementada en IDL.

El simulador se corrió 100 veces con el objetivo de afectar reiteradas veces la superficie de la matriz dominio. Cada corrida consistió en prender 10 igniciones con 500 pasos de tiempo cada una. En total se simularon 1000 incendios. El total de las simulaciones fueron acumuladas iterativamente de acuerdo a un ciclo anidado de operaciones. Esto permitió obtener una nueva matriz resultado con la frecuencia de encendido para cada pixel. Podemos estimar que a mayor frecuencia de pixeles quemados indica mayor peligro de propagación.

5.4. Resultados

5.4.1. Condiciones iniciales

Se describen los tres componentes de inicio de las simulaciones: 1) las condiciones de Amenaza, 2) las condiciones de vulnerabilidad, y 3) la distribución espacial de los puntos de ignición del territorio. Estos tres componentes, definen las condiciones iniciales del proceso de simulación. Como fue explicado, las condiciones de amenaza están dadas por la cercanía de accesos y actividades recreativas dentro y fuera del parque, interpretando que allí es donde existe mayor flujo de personas, existe mayor probabilidad de suceder igniciones. La vulnerabilidad (daño potencial) fue determinada a partir de una pseudo combinación de modelos de combustibles, obtenidos a partir de un índice sintético basado en el cálculo de NDVI. El cual suponemos que representa una combinación de atributos de la vegetación, basados en características a nivel estructural y fisiológico. En teoría, la caracterización estructural corresponde a las formas de vida (herbáceo-leñosas) distribuidas a lo largo del gradiente altitudinal del parque, y las condiciones fisiológicas corresponden al nivel de actividad fotosintética de los combustibles. Esta combinación de caracteres determina el nivel de combustibilidad de las coberturas. El simulador opera de acuerdo a la “bondad” de los combustibles, es decir, que la dirección de propagación será en función de la disponibilidad y el nivel de combustibilidad de los modelos de combustibles presentes. Nuevamente, los puntos de ignición fueron localizados a partir de un muestreo al azar, acumulados de acuerdo al nivel de amenaza del terreno, colocando a menor distancia, mayores igniciones.

A partir de las condiciones iniciales planteadas se construyeron tres cartografías. En la figura 42, en el cuadrante superior izquierdo, se presenta una imagen SPOT con fecha el 26/06/2012 con una combinación falso color RGB: IRc-R-V. A su derecha, se presenta las condiciones de los combustibles estimados de acuerdo a la imagen SPOT previa. El rango de valores va de 0 a 1, donde las coberturas con mayor valor indican una mayor proporción de combustibles. El cuadrante de abajo a la izquierda, representa a la amenaza, la cual está determinada de acuerdo a las distancias a caminos, y como parte de un área de influencia a zonas de predominio de actividades humanas, también con un rango de valores de 0 1. El cuadrante a su derecha corresponde a la localización de los puntos de ignición, en función a la cercanía de las zonas con mayor accesibilidad humana. Se distribuyeron 1000 puntos de ignición sobre la superficie del terreno.

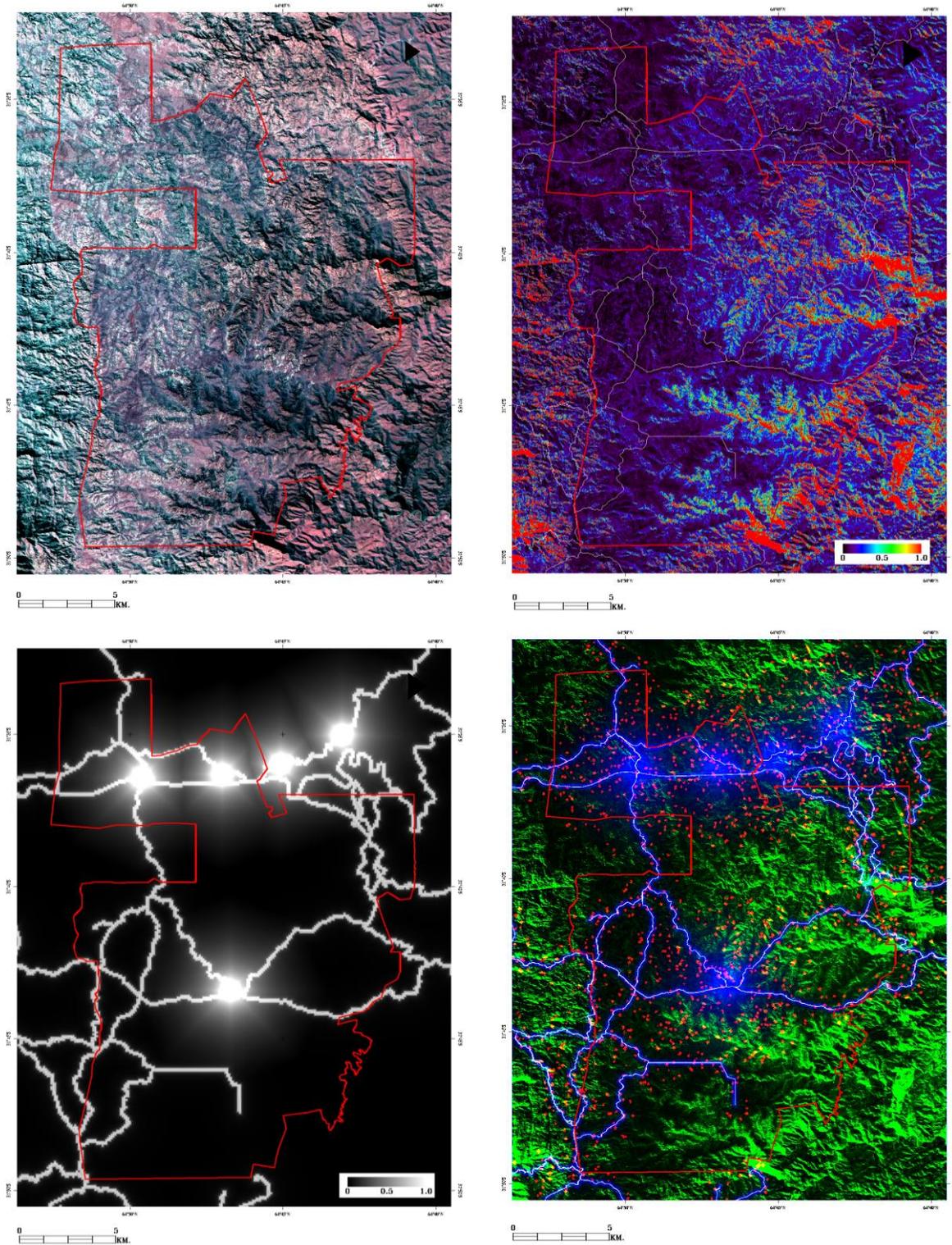


Figura 42: Cartografías sobre las condiciones iniciales planteadas para la simulación de la propagación de incendios. Arriba a la izq. Se presenta la imagen SPOT empleada de base. Arriba a la derecha se presentan los pseudo combustibles. Abajo a la izq. Se presenta la cartografía de amenaza y a la derecha los puntos de ignición.

5.4.2. Estimaciones de riesgo

Los resultados se presentan de acuerdo a dos aproximaciones: A) Riesgo de incendio como fue planteado previamente: $R = V \times A$, y B) Riesgo de propagación. La idea es presentar un análisis comparativo entre ambas aproximaciones, y determinar la importancia de incorporar un análisis dinámico a las estimaciones de riesgo convencionales basadas en la amenaza y la vulnerabilidad. Previo a iniciar la descripción de los resultados, se remarca que los índices elaborados, fueron construidos con datos que no necesariamente reflejan la realidad del PNQC. Son aproximaciones a la realidad, que tienen el fin de representar elementos de una propuesta metodológica.

La figura 43 representa a la izquierda la multiplicación de las capas correspondientes a la Amenaza y la Vulnerabilidad. Se puede observar cómo se funden los valores de mayor amenaza relacionados a la cercanía de vías de comunicación del parque, junto a los valores de mayor vulnerabilidad relacionados al tipo y estado de los combustibles. El índice de propagación construido corresponde a la figura de la derecha. La paleta de colores indica el resultado de las simulaciones de incendios acumuladas. Cada pixel de la imagen, representa la frecuencia de quemado, es decir, el número de veces que fue afectado por un incendio. Los valores de frecuencia fueron normalizados a un rango de valores entre 0 y 1, donde los valores más altos están representados en colores amarillos y rojos. La paleta de colores empleada es la misma para ambas estimaciones de riesgo para poder hacer una comparación directa. Para el caso A), los valores de mayor riesgo están concentrados en las vías de comunicación, con una caída gradual de los valores hacia zonas intermedias y de baja combustibilidad. El caso B) indica una concentración de valores de mayor riesgo en las zonas que concentran mayor proporción de combustibles. Se destacan 4 núcleos o zonas de mayor riesgo, distribuidas en el sector este del parque, allí donde la propagación de los incendios simulados fue más frecuente.

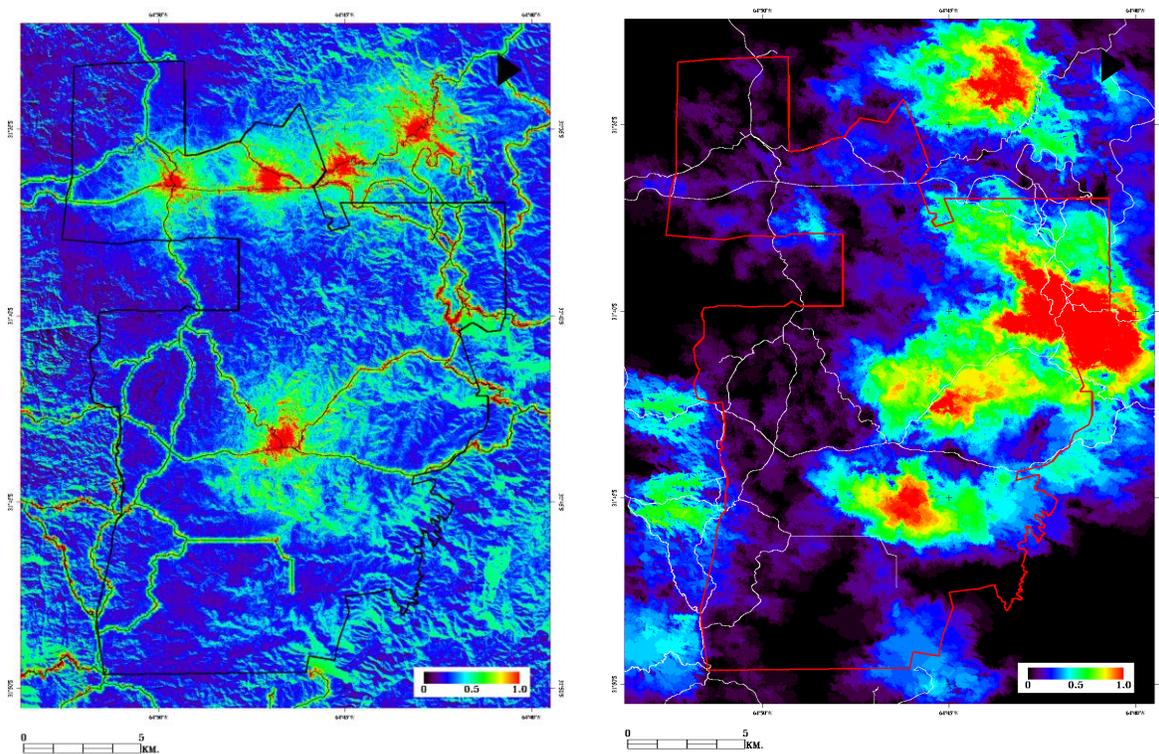


Figura 43: Estimaciones de riesgo de acuerdo a distintos metodos. A la izquierda el índice de riesgo convencional, y a su derecha el índice de peligro de propagación.

5.4.3. Casos especiales

5.4.3.1. Efecto del viento

Una de las variables más dinámicas y a su vez más difíciles de predecir, es el comportamiento del viento. El efecto del viento sobre un incendio es crucial, ya que su incidencia puede influir en muchos aspectos del comportamiento de un incendio. La dirección y la intensidad del viento, determinan el avance o retroceso de un frente de llamas, determinando la velocidad de avance y dirección. Para este trabajo, se consideró a la dirección e intensidad del viento a partir de un vector lineal construido como una matriz de números fijos. El efecto fue incorporado al simulador, y se ejecuta en forma homogénea para todos los pixeles del dominio. Para tener una idea de cómo es el comportamiento de una simulación y el efecto del viento, se presentan tres casos de incendios simulados distribuidos en zonas de diversas condiciones de combustibilidad (figura 44). Se puede observar como contribuye el efecto del viento a un desplazamiento de la propagación del incendio hacia sectores opuestos al punto de ignición.

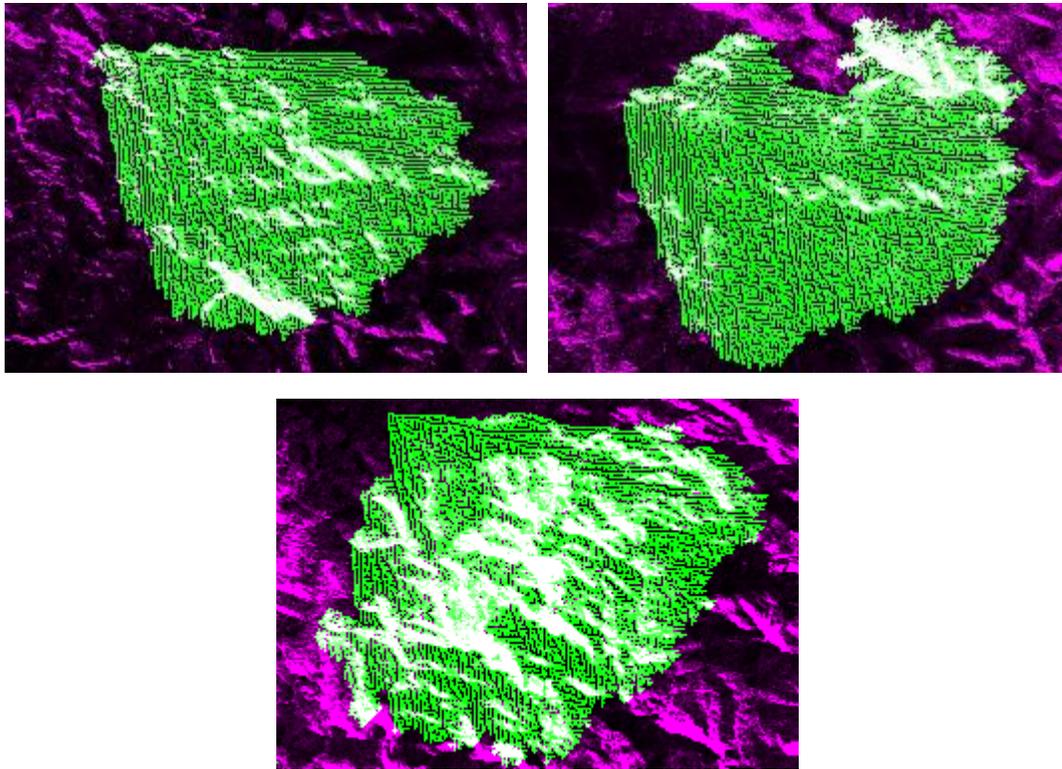


Figura 44: Efecto del viento para 3 simulaciones de incendios bajo diversas condiciones de amenaza y vulnerabilidad. En color violeta se representa la matriz de combustibles, y en color verde la simulación de la propagación de incendios con el efecto del viento incorporado.

Lo ideal por supuesto, sería contar con una matriz dinámica que represente para cada pixel el valor de intensidad y su dirección, con un alto nivel de actualización espacio-temporal. En su defecto para este modelo, la matriz es estática, y representa vientos provenientes en forma unidireccional del sector Nor Oeste.

El índice de propagación calculado con el efecto del viento se presenta en la figura 45. Al igual que el caso previamente presentado, el proceso de simulación consistió en acumular un total de 1000 igniciones, todas ellas en este caso, influenciadas por la dirección e intensidad el viento, proveniente del sector Nor oeste del PNQC.

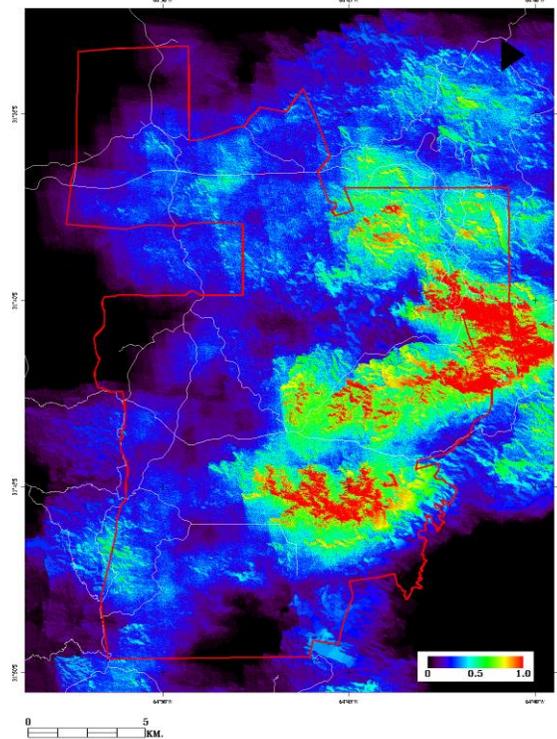


Figura 45: Índice de peligro de propagación con efecto del viento NO.

Como se puede observar, el efecto del viento impacta sobre la dirección de propagación de los incendios simulados, derivando sensiblemente a un aumento de los valores de peligro de propagación hacia el sector Sur este del parque.

5.4.3.2. Efecto del corta fuego

Los cortafuegos son una de las herramientas más comunes utilizadas para prevenir el paso del fuego hacia un sitio que se desea proteger. Por lo general, se emplean como parte de un camino existente, o bien se buscan elementos no combustibles del paisaje, como afloramientos rocosos o cuerpos de agua, para trazar corredores o picadas entre sí. En general, construir cortafuegos es costoso económicamente y conlleva mucho trabajo de campo. Una forma común, más económica y práctica, es el uso de quemas prescriptas bajo condiciones controladas.

En el PNQC existe actualmente un proyecto que planifica la elaboración de un cortafuego para proteger un importante mosaico de bosques de Tabaquillo (*Polylepis Australis*). De acuerdo al intendente del parque, la presencia de un cortafuego prevendría el paso de un incendio hacia las zonas de alto valor de conservación del parque, o al menos, permitiría frenar la velocidad de

avance de un incendio, facilitando a los cuerpos de bomberos del parque a tener más tiempo para arribar a la zona.

Para representar el efecto de un cortafuego en el proceso de simulación, se incorporó a la matriz de bondad, es decir a aquella que define la probabilidad de que un pixel se encienda o no, un vector con valor de combustibilidad nulo. El cortafuego fue ubicado de acuerdo a las indicaciones del intendente del PNQC, sobre un camino interno cercano a la zona de mayor densidad de *Polylepis Australis*.

En la figura 46 se presenta el índice de propagación construido de acuerdo al efecto del cortafuego. En color magenta, se representa la ubicación del cortafuego simulado.

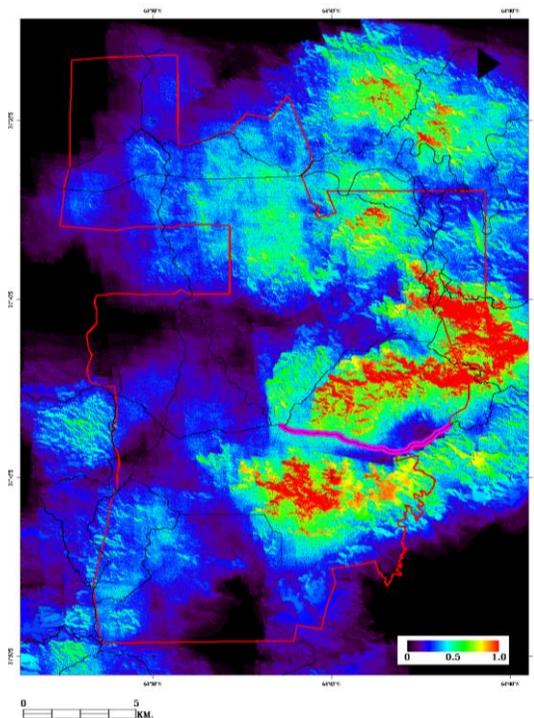


Figura 46: Índice de peligro de propagación con efecto del cortafuego.

Para poder comparar la magnitud de los efectos del viento y del cortafuegos, se construyeron tres perfiles en sentido longitudinal ubicados inmediatamente al sur del cortafuego: 1) Testigo: es el resultado del índice de propagación sin efecto (rojo), 2) Con viento NO: Corresponde al efecto del viento (azul), y 3) Con viento y Cortafuego (verde) (Figura 47).

Se puede observar una marcada diferencia en el trazado de cada uno de los perfiles. En particular, se denota el efecto de los vientos y el efecto del cortafuego en relación al perfil testigo (perfil rojo). Prácticamente para todo el rango de los valores muestreados, el perfil

testigo presenta valores por debajo de los perfiles con efecto. En particular, la diferencia se hace más notable a partir del píxel 500, allí donde se detectan mayores proporciones de combustibles. El efecto del cortafuego, se denota claramente a partir de la caída de los valores, en torno al píxel 700, allí donde está ubicado espacialmente el cortafuego.

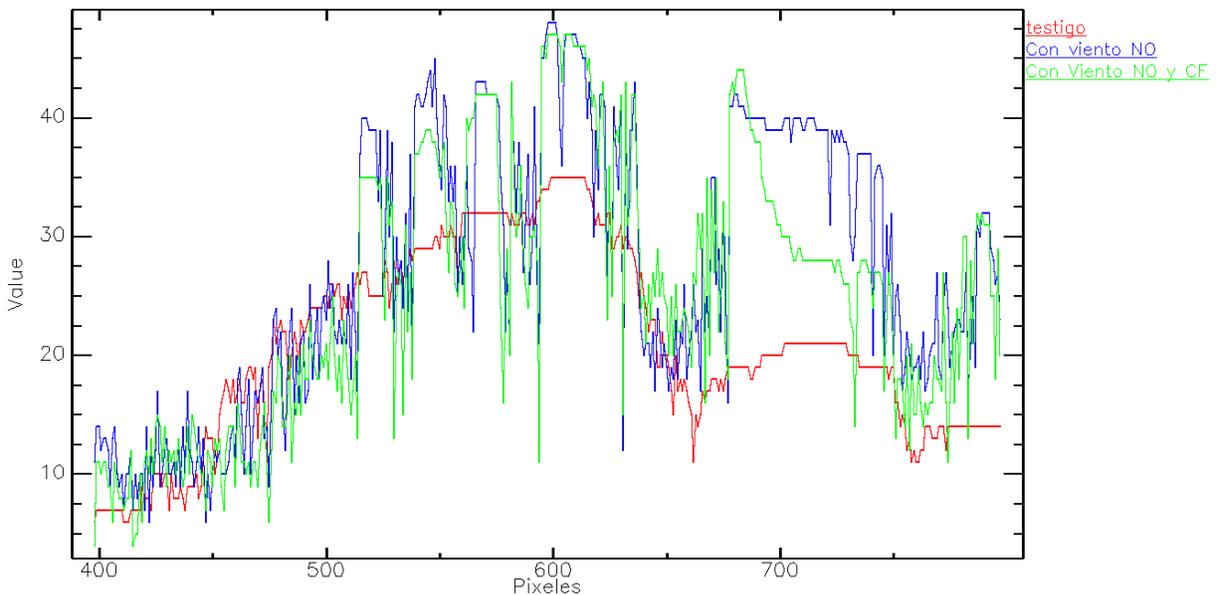


Figura 47: Perfiles longitudinales representativos de la frecuencia de píxeles quemados para tres modelos de índices de propagación. En rojo se presenta el caso testigo, en azul el caso con viento, y en verde el caso con viento y cortafuego.

5.5. Conclusiones

La simulación de incendios, se presenta como una poderosa herramienta para ser incorporada dentro de las estimaciones de riesgo convencionales. La integración de un componente relativo a la probabilidad de propagación, contribuye a un mejor entendimiento sobre la realidad, lo cual determina la posibilidad de interpretar al riesgo desde una perspectiva dinámica sobre las condiciones que favorecen la ocurrencia de incendios.

Este capítulo ha contribuido a afianzar la formación sobre el uso de herramientas de modelado numérico de procesos ambientales. Los resultados deberían de ser interpretados solo como un primer paso exploratorio en el camino de incorporar herramientas de modelos de simulación en la estimación de este tipo de fenómenos dinámicos.

Capítulo VI

6. Desarrollo de una aplicación de detección de Áreas quemadas y evaluación de daños a partir de datos de Radar de Apertura sintética (SAR) y datos ópticos¹

MÓDULO de detección de Áreas Quemadas (MoDAQ)

Producto: Áreas Quemadas (MoDAQ_p1)

6.1. Resumen

Los incendios en la Isla de Cerdeña son uno de los factores ambientales más importantes que controlan el funcionamiento y la estructura del ecosistema. La evaluación de los efectos del fuego por medio de sensores remotos es económica y prácticamente la mejor manera para valorar daños antes de realizar trabajos de campo. El uso de técnicas alternativas para evaluar los efectos producidos por incendios es necesario, particularmente para determinar la pérdida de biomasa a nivel regional. La adquisición de datos por medio de sensores de radar puede presentar ciertas ventajas con respecto a los sensores ópticos. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de un algoritmo semiautomático sobre imágenes SAR de banda L del sensor PALSAR, montado sobre el satélite ALOS, para la estimación del área quemada. Para evaluar la calidad de la estimación, los resultados obtenidos a partir del radar fueron comparados con aquellos obtenidos en base a datos ópticos e información a campo. El trabajo incluido en este capítulo, corresponde a las actividades realizadas en el marco de la tutoría de investigación de la maestría AEARTE desarrollada en el CRPSM, que culminó con una publicación en la revista European Journal of Remote Sensing [22].

6.2. Introducción

Durante el año 2009, la Isla de Cerdeña sufrió 684 incendios de tamaño considerable, afectando 37104 ha, de las cuales 12270 ha eran de vegetación boscosa, según reportó JRC 2009. Según datos históricos, la isla se quema todos los años con importantes impactos en la pérdida de vegetación boscosa. Se cree que períodos más largos de tiempo seco pueden contribuir de manera negativa a la pérdida de biomasa, ya que el combustible se seca aún más y su susceptibilidad a quemarse aumenta [123]. Relacionado a esto, hay un crecimiento en la preocupación por conservar áreas boscosas como depósitos de carbono y, por otro lado, evitar

la alta frecuencia de incendios, ya que contribuye a liberación extra a la atmósfera de gases con efecto invernadero. Por lo tanto, la estimación de áreas quemadas y la cuantificación de la pérdida de biomasa es un parámetro crítico para comprender cómo los incendios contribuyen al consumo de distintos tipos de vegetación, y cómo esto está relacionado a la pérdida de depósitos de carbono y su liberación a la atmósfera. Algunos trabajos reportaron la utilidad de los datos del Synthetic Aperture Radar (SAR) por proveer información en patrones de disturbio mediante la detección de cicatrices de incendios [124–127], y por el estudio de efectos del incendio en áreas forestadas [128]. La capacidad de detectar áreas quemadas con SAR, así como para cualquier proceso ecológico, dependerá en principio en la definición de los parámetros óptimos del sistema, incluyendo la frecuencia de la microonda, polarización, ángulo incidente, resolución, y frecuencia de muestreo [127]. Estas características determinarán el tipo de mecanismo de retrodispersión sobre terrenos forestados, y relacionados a éstos, el tipo de efectos producidos por el disturbio del incendio. El sensor ALOS/PALSAR es un radar de microonda con banda L (23cm) que posee una capacidad de penetración profunda en la canopia, interactuando con ramas de gran porte, troncos de árboles, e incluso a veces con el suelo [129]. Se espera que el efecto del incendio en la reducción de la estructura de la canopia, produzca un descenso en la señal de retrodispersión, dependiendo en el modo de polarización. Existen evidencias de que la configuración HV de polarización cruzada (Transmisión horizontal, recepción vertical) [130] es el modo más efectivo para detección de áreas quemadas, ya que demuestra buena sensibilidad a la biomasa, siendo también la menos afectada por los distintos tipos de bosques y condiciones de suelo [131]. El ángulo de incidencia del haz del radar afectará en la proporción de la señal de la retrodispersión, debido a que distintos ángulos exponen diferentes estructuras de ramas y sus orientaciones. Por consiguiente, el patrón de la estructura de la canopia posterior al incendio, y los parámetros óptimos del sistema SAR, determinarán la interpretación de los efectos asociados al incendio. Para bosques de pino en la zona del Mediterráneo, Tanase informó sobre la buena combinación entre la banda L y la polarización HV para la evaluación de severidad de incendio. En este trabajo, procuramos demostrar la capacidad de los datos ALOS/PALSAR para estimar el efecto de incendios sobre diferentes tipos de vegetación del Mediterráneo y cobertura de terrenos, y desarrollar una metodología para estimación a partir de datos SAR, validado por el uso tradicional de métodos ópticos de estimación de áreas quemadas y datos verificados a campo.

6.3. Materiales y Métodos

6.3.1. Área de estudio

La Isla de Cerdeña se caracteriza por un clima Mediterráneo con veranos calurosos y secos, y una época de lluvia concentrada en las estaciones de invierno y primavera. La heterogeneidad de la topografía comprende regiones con colinas y valles interiores. A lo largo de la costa y valles de ríos, la vegetación se encuentra dominada por arbustos del genero Sclerophyllous, bosques

de Thermo Mediterranean Quercus Ilex, y tierras con producción agrícola. Las zonas del interior se caracterizan por bosques en combinación con pasturas y matorrales. Los bosques están formados principalmente por los árboles meso-mediterráneos Quercus Ilex y Quercus Suber. A mayor elevación los bosques de robles Sclerophyllous se funden con los bosques las latifoliados Quercus Congesta y Quercus Ichnusae [123]. En la isla de Cerdeña los incendios son uno de los factores más importantes de control ambiental que afecta el funcionamiento y estructura del ecosistema, siendo responsable del paisaje y sus tipos de vegetación. Sin embargo, cambios en el régimen natural de incendios han llevado a que éstos ocurran de manera más frecuente e intensa, representando un factor de degradación, con impactos significativos sobre bosques. En este trabajo analizamos un incendio ocurrido el 23 de Julio de 2009 en la isla de Cerdeña, en la localidad de Pardu a lo largo de las municipalidades Pau, Villaurbana, Usellus y Villa Verde (Lat: 39 49 35.3 N Lon: 8 48 02.8 E). El incendio afectó un total de 2242 ha según informó el Corpo Forestale e di Vigilanza Ambientale (CFVA) de la Regione Autonoma della Sardegna, de lo cual el 50% del área afectada era vegetación boscosa (Figura 48).

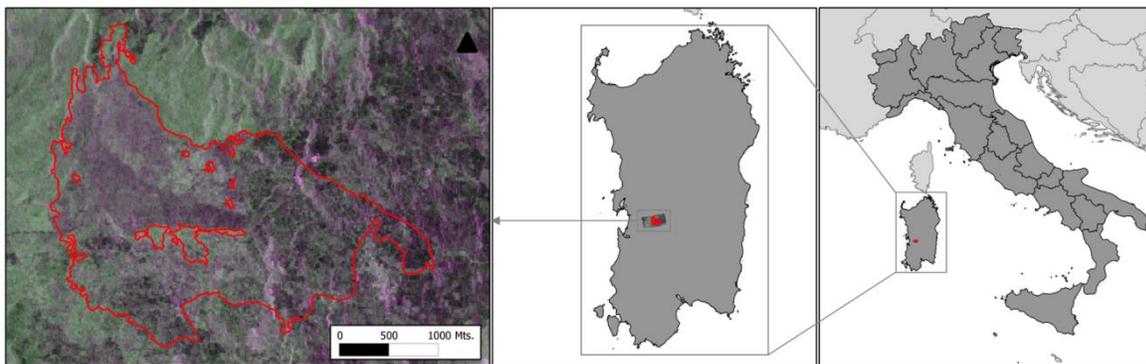


Figura 48: La isla de Cerdeña y el área de estudio con el detalle del perímetro quemado: Imagen ALOS en RGB: HH, HV, HH.

6.3.2. Datos SAR

Los datos SAR utilizados en este estudio corresponden al Advance Land Observing Satellite (ALOS) Phased Array Type L-band SAR (PALSAR) (Figura 49). Las imágenes fueron adquiridas en fechas anteriores y posteriores al incendio ocurrido, el 22 de Junio de 2009 y 22 de Septiembre de 2009 respectivamente. La fecha de la imagen previa al incendio es de 31 días antes de que éste haya ocurrido, y la fecha de la imagen posterior al mismo evento es de 61 días después. Las imágenes ALOS fueron calibradas usando el software NEST para poder obtener σ_0 (dB), y luego ser registrados a una referencia en común (Geographic WGS-84).

6.3.3. SAR – Análisis estadístico

Valores medios de dB en los sitios previos y posteriores al incendio fueron extraídos para los diferentes tipos de vegetación afectados por el mismo. El análisis estadístico fue hecho por separado para ambos modos de polarización HH y HV. Se interpreta que las diferencias negativas de dB entre los valores previos y posteriores al incendio para cada tipo de vegetación están relacionadas con el efecto del incendio.

6.3.4. SAR – Estimación de área quemada

El análisis se llevó a cabo usando un recorte de la imagen sobre el perímetro quemado (la verificación a campo del perímetro fue obtenida de la Regione Autonoma della Sardegna). Calculamos la diferencia entre imágenes previas y posteriores al incendio (Ipre-Ipost) solo para el modo de polarización HV (ΔHV). La imagen resultante fue filtrada con un filtro adaptativo “Enhanced Frost” con un tamaño de ventana de 11x11, con el propósito de aislar los valores positivos de la imagen. Los valores positivos extraídos fueron seleccionados como quemados y los valores negativos como no quemados, estableciendo como valor umbral el 0. De este modo se generó una imagen binaria (quemado/no quemado) (Figura 49).

6.3.5. Datos ópticos

Usamos una imagen óptica SPOT-4 tomada después del incendio (27/07/2009). Una simple metodología se desarrolló para obtener el perímetro del área quemada, usando valores de Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Burn Ratio (NBR) y la banda 3 de Infrarrojo cercano como variables principales (Figura 50). Umbrales óptimos fueron obtenidos a partir de interpretación visual de manera independiente para cada uno de las variables, evitando en la mayor medida posible los errores por comisión. Tales errores pueden corresponder a superficies con respuesta espectral similar al quemado, como lo son los suelos desnudos o cuerpos de aguas [17]. Mediante el método propuesto se busca evitar incurrir en la sobre estimación de área quemada.

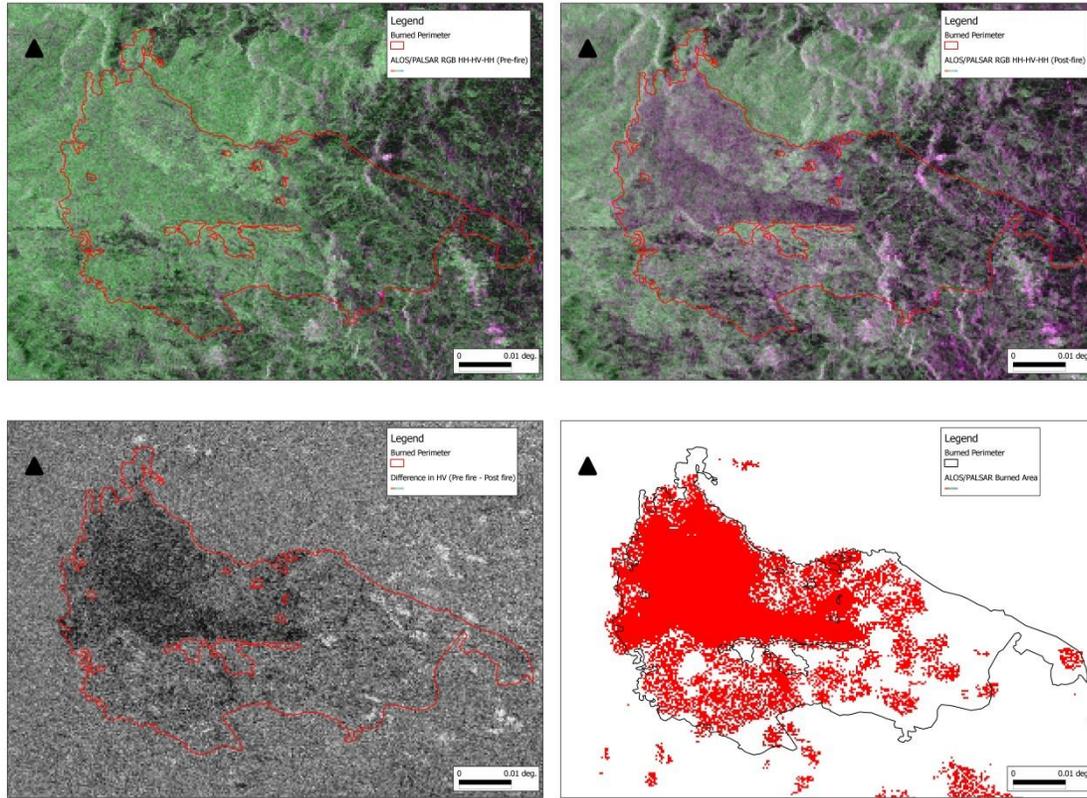


Figura 49: Datos ALOS/PALSAR: Arriba a la izquierda; imagen previa al incendio. Arriba a la derecha; imagen posterior al incendio. Abajo a la izquierda; Diferencia en la polarización HV. Abajo a la derecha; estimación de área quemada por valores de umbrales positivos proveídos por datos de ΔHV SAR.

6.3.6. Datos complementarios

Los tipos de vegetación quemados fueron identificados con el Corine Land Cover 2006 map. La extracción de muestras para datos fue basada en una imagen mosaico ortorectificada obtenida on-line por un servidor WMS. Cuatro tipos de vegetación ó coberturas del terreno fueron afectadas por el incendio de Pardu: 1-bosques de coníferas, 2-pasturas naturales, 3-vegetación de Sclerophyllous y 4-zonas agrícolas.

6.4. Resultados

La polarización HH exhibe un efecto similar y continuo de elevada retrodispersión sobre los diferentes tipos de vegetación luego del incendio (Figura 51). Este resultado demuestra que la señal proveniente del modo de polarización HH no presenta la suficiente variabilidad para lograr discriminar el efecto del fuego sobre los distintos tipos de vegetación afectados. Se comprobó

por medio de otros trabajos que el efecto de la respuesta de la retrodispersión elevada luego del incendio con la polarización HH era debido a propiedades dieléctricas de los retrodispersores, con contenido más elevado de humedad [128]. Por otro lado, para la polarización HV se observa mayor variabilidad en las señales de respuesta de la retrodispersión para los diferentes tipos de vegetación, siendo más evidente la disminución sobre tipos de vegetación boscosas (Figura 52).

Asumiendo que los datos dB pueden ser aproximados mediante una distribución gaussiana; la vegetación Sclerophyllous presentó la mayor reducción en los valores de dB (Reducción media = 3.4dB, n=1412, p<0.001), sugiriendo un mayor daño estructural en comparación con los otros tipos vegetativos.

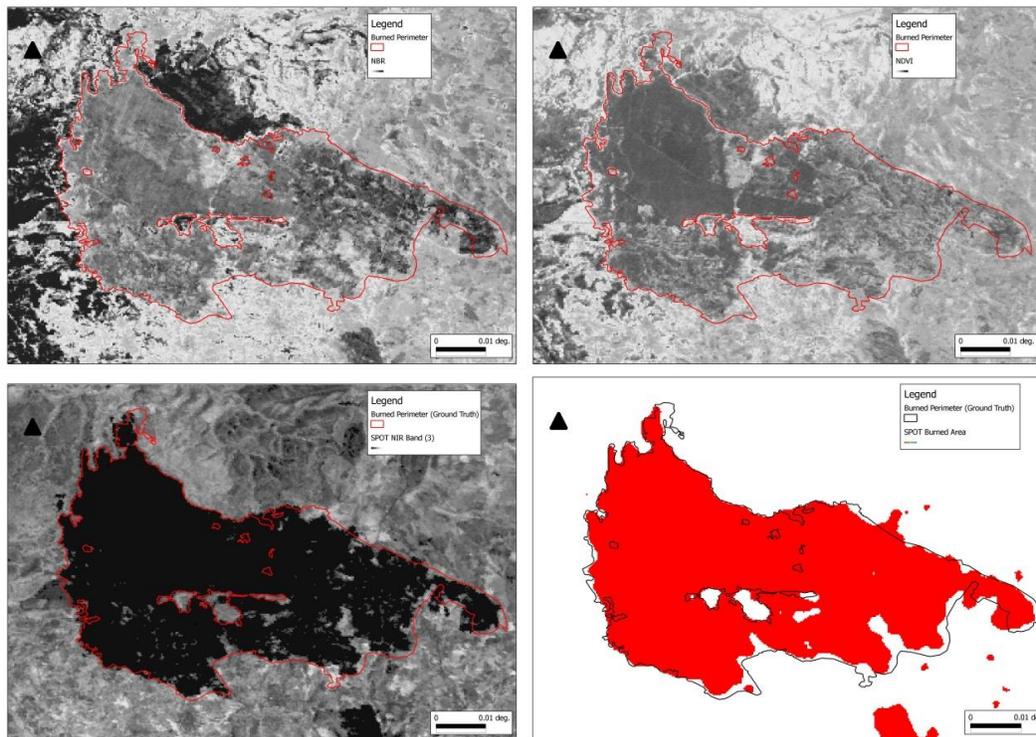


Figura 50: Datos ópticos de SPOT-4; Arriba a la izquierda; Normalized Burned Ratio (NBR). Arriba a la derecha; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Abajo a la izquierda; Infrarrojo Cercano (IRc). Abajo a la derecha; estimación del área quemada a partir de umbrales de los índices y datos espectrales del IRc.

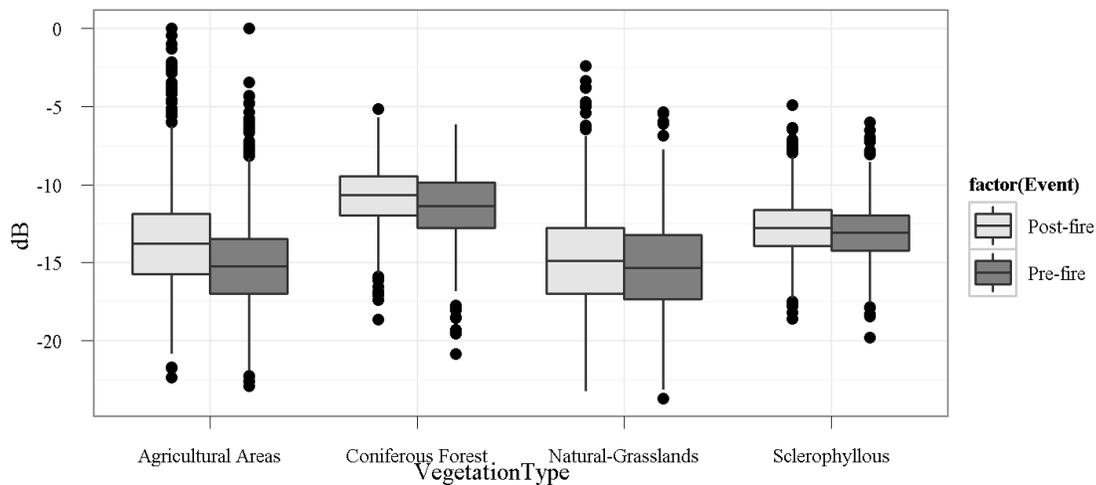


Figura 51: Interacciones entre datos SAR previos y posteriores al incendio con modo de polarización cruzada HH.

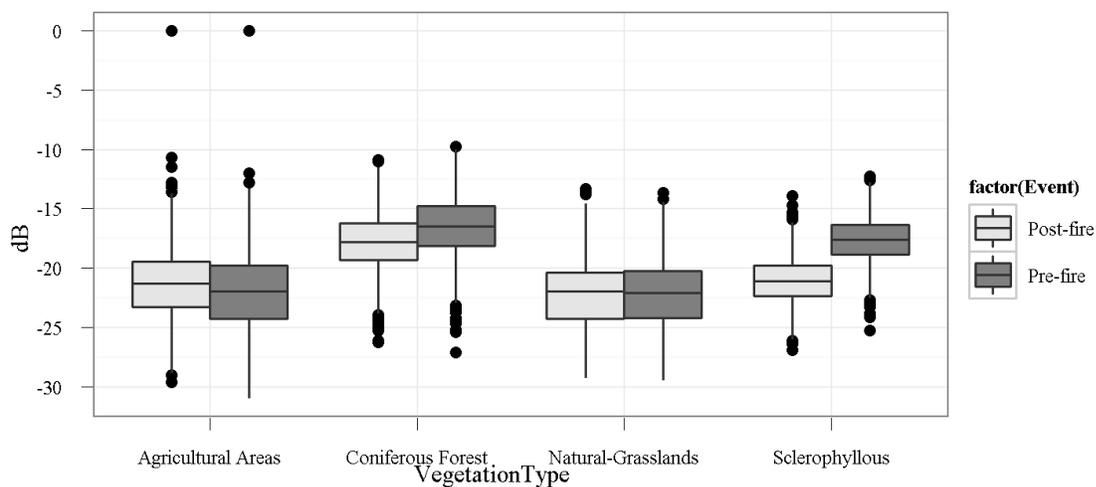


Figura 52: Interacciones entre datos SAR previos y posteriores al incendio con modo de polarización HV.

Los bosques de coníferas también mostraron una reducción significativa en valores medios de dB (Reducción media = 1.2dB, n=951, P<0.001), pero con una menor diferencia media con respecto a la vegetación de Sclerophyllous (Tabla. 25).

	Polarization									
	HH					HV				
	Post-fire		Pre-fire			Post-fire		Pre-fire		
	Mean dB	S.D	Mean dB	S.D		Mean dB	S.D	Mean dB	S.D	
Vegetation Types										
Agricultural Areas	-13.66897	3.032	-15.131	2.909	***	-21.267	2.996	-21.883	3.419	
Coniferous Forest	-10.81376	1.854	-11.465	2.206		-17.858	2.412	-16.619	2.616	***
Natural Grasslands	-14.64136	3.279	-15.235	3.173	***	-22.179	2.752	-22.276	3.031	
Sclerophyllous Vegetation	-12.81717	1.740	-13.098	1.724	***	-21.084	1.857	-17.687	1.883	***

Tabla 25: Análisis estadístico para los eventos previos y posteriores al incendio (Test de Student), considerando el efecto de distintas polarizaciones sobre tipos de vegetaciones diferentes.

Las pasturas naturales fueron insensibles a la señal de la polarización HV, demostrando que probablemente no sea de utilidad la polarización HV para verificar los efectos del incendio en tipos de vegetación herbácea para las típicas regiones Mediterráneas. Sin embargo, también es posible que las pasturas se recuperen luego de 60 días, y el daño estructural esté casi reparado. Áreas agrícolas presentaron un aumento similar en su comportamiento como ya se ha visto en el modo de polarización HH, dejando menos en claro cuáles son las interacciones principales involucradas. La metodología de estimación de área quemada fue basada en el hecho de que la polarización HV resultó ser más sensible a los efectos del incendio en vegetación boscosa. La diferencia en HV (previo y posterior) evidenció una correlación espacial con los tipos de vegetación boscosa, con mayores valores oscuros de dB relacionados a daño estructural (Figura. 50). Los resultados demuestran un acierto entre el 70 y 80% del área quemada para la vegetación de Coníferas y Sclerophyllous comparadas con el perímetro verificado a campo. Las áreas agrícolas y de pasturas naturales presentaron un acierto bajo, cuyos valores de relación fueron entre 25 y 35% (Figura 53). Otros estudios en bosques tropicales demostraron resultados similares para áreas agrícolas mixtas [132]. Los errores por omisión fueron evaluados para cada tipo de vegetación, de acuerdo con su proporción relativa dentro del perímetro verificado a campo: áreas agrícolas presentaron el mayor error por omisión (0.74) seguido por bosques de coníferas (0.65), pasturas naturales (0.27) y tipos Sclerophyllous (0.21). No hubo errores por comisión según la información del perímetro verificado a campo. Es concluyente que la vegetación arbustiva puede estar más expuesta a las llamas del incendio, con la consecuente destrucción total de los componentes estructurales de la canopia, con mayor posibilidad a ser detectado con datos SAR (Ver ejemplo en la Figura 6). La menor reducción de la media de valores de dB para bosques de Coníferas en comparación con los tipos de Sclerophyllous podría relacionarse con la altura de los árboles, que tienen menos contacto con las llamas del incendio. Estos resultados indican la posibilidad del uso de imágenes ALOS/PALSAR L-HV para la evaluación de daños por incendio en Regiones Boscosas del Mediterráneo, especialmente bajo condiciones desafiantes del clima. Una combinación entre datos ópticos y de SAR podrían explorarse para una mejor discriminación de todos los tipos de estructuras vegetativas.

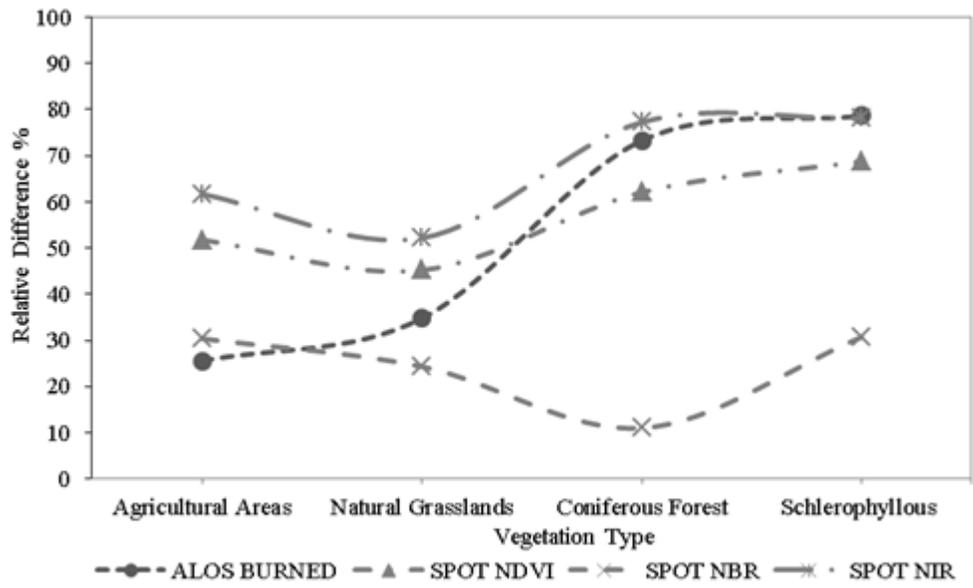


Figura 53: Relación total para los distintos tipos de vegetación entre datos de reflectancia óptica y datos SAR.

Capítulo VII

Conclusiones

El trabajo de tesis desarrollado presenta los avances sobre el diseño y desarrollo de un sistema operacional orientado a la planificación y el manejo de incendios a partir de información espacial. La problemática del fuego en Argentina abarca una variedad de aspectos socio-ambientales y económicos que necesitan ser abordados en forma descentralizada y operativa. Para ello, se cree fundamental contar con una fuente de información que provea los datos necesarios para abordar la problemática desde cada lugar del País que fuera afectado.

Desde el punto de vista preventivo, del manejo o de la evaluación de daños de incendios es esencial producir información en forma estandarizada y continua en el tiempo, con el objetivo de proveer ininterrumpidamente datos de utilidad para cada una de las fases de desarrollo del fenómeno.

La visión del trabajo fue el desarrollo de un sistema integral y operativo, que abarque todas las etapas involucradas para el seguimiento, la detección y cuantificación de incendios. Se estableció un marco conceptual basado en la definición de tres etapas del fenómeno: *pre fuego*, *durante*, y *post fuego*. De esta manera, el fenómeno fue definido como parte de un ciclo, lo cual sirvió conceptualmente para establecer los límites y el alcance del ambiente operacional del sistema.

En la primera parte del trabajo aquí propuesto, se ideó un marco de referencia para formular el desarrollo de un software de acuerdo a estándares de producción que son requeridos por CONAE. El estándar determina una serie de fases a partir de las cuales se establece lo que se conoce como el ciclo de vida del software. El ciclo, es integrador en cuanto a la cadena de actividades que involucra el desarrollo del software de inicio a fin, y permite tener una visión global y orientativa sobre las responsabilidades y la documentación pertinente a lo largo del proyecto.

En el capítulo 2 se desarrolló el análisis de los requerimientos de usuarios, organizados de acuerdo a las etapas anteriormente identificadas, pre, durante y post fuego. El análisis de los requerimientos, se basó en la percepción espontánea sobre la necesidad de un sistema de alerta y respuesta temprana a incendios de vegetación en Argentina, en la investigación de software existente desarrollados por otros países, y fundamentalmente a partir de entrevistas y reuniones organizadas con organismos que se detectaron como potenciales usuarios del sistema. Dentro de la fase pre fuego se identificaron dos fuentes de requerimientos. Por un lado se identificó como un requerimiento general la planificación y el manejo del riesgo de incendios a distintas escalas espaciales. Los procesos y las actividades necesarias para satisfacer este

requerimiento, se concentraron dentro del módulo de procesamiento definido como “MoPRI” (Módulo de Peligrosidad y Riesgo de Incendios) el cual tiene la función de producir la información específica para cumplir con los requerimientos relacionados al riesgo de incendios. Por otro lado, y dentro de la fase pre fuego se identificaron requerimientos referentes a las condiciones del comportamiento de incendios y sus características de propagación. Para este conjunto de requerimientos se definió el Módulo de procesamiento denominado “MoSIMI” (Módulo de Simulación de Incendios), el cual es el responsable de ejecutar pedidos sobre simulaciones de la propagación de incendios. Correspondiente a la etapa definida como Durante, se definió como requerimientos global, la detección y seguimiento de la ocurrencia de eventos de incendio a nivel regional. Este requerimiento se basó en la necesidad de contar con información precisa y actualizada sobre la ocurrencia de eventos de incendios, a partir de la cual, los usuarios puedan identificar en tiempo cuasi-real la ubicación aproximada del inicio de un evento, poder seguir su evolución temporal, y lograr caracterizar las formas y superficie de las cicatrices. Estos requerimientos fueron resumidos en el Módulo denominado “MoDIIA” (Módulo de detección e Identificación de incendios Activos). Para la etapa post fuego, el requerimiento general fue la detección de áreas quemadas y el seguimiento de la regeneración de las coberturas afectadas. El Módulo responsable de cumplir con tales requisitos, fue denominado “MoDAQ” (Módulo de Áreas Quemadas).

En base a estas definiciones, se realizó un análisis detallado de los requerimientos de acuerdo a cada uno de los módulos definidos. Como resultado de desglosar los requerimientos a un nivel de detalle superior, el trabajo se orientó a identificar los productos que cumplieran con tales requerimientos.

En el capítulo 3, se definió el diseño arquitectónico del sistema y se especificaron en detalle los productos identificados en el capítulo anterior. La arquitectura del sistema se propuso de acuerdo a un esquema distribuido o modular, a partir de diferentes subsistemas y nodos de procesamiento. Se detallan las funciones específicas de cada subsistema dejando abierta la posibilidad de ampliar la descripción y el vocabulario empleado en este trabajo.

En el capítulo 4 se presentó el desarrollo de uno de los productos identificados como prioritarios dentro del análisis de requerimientos para el Módulo MoDIIA; el que corresponde a la detección de eventos de incendio a partir de datos de focos de calor. Su diseño se propuso como una aplicación operativa con un mínimo de intervención humana, desarrollado a partir de software de código libre. El software empleado para el desarrollo de este producto fue R, dado que cuenta con una amplia cantidad de aplicaciones orientadas al manejo de datos espaciales. En la primera parte del capítulo, se presentan ejemplos de análisis espacial de patrones de puntos para aplicaciones relacionadas a incendios forestales, con el objetivo de orientar sobre las posibilidades de análisis y la familiarización con las herramientas del software R. Luego se presenta la metodología desarrollada para la detección de eventos, la cual fue definida a partir de un esquema general del proceso. Cada una de las etapas de procesamiento fue descrita en función del objetivo general y de acuerdo al tipo de herramienta empleada en cada faceta del trabajo, indicando los resultados parciales obtenidos en cada etapa. La primera fase de procesamiento del producto consistió en el agrupamiento espacio temporal de focos, con el

objetivo de identificar las detecciones pertenecientes a un mismo evento. Esto corresponde en primera instancia a un agrupamiento temporal a nivel mensual, y luego el agrupamiento espacial basado en una función de distancias al vecino más cercano. En segundo lugar, el proceso pasó por una etapa de caracterización de las formas y la estimación de la superficie quemada correspondiente a los grupos de focos detectados en la fase anterior. En esta etapa, se emplearon técnicas de geometría computacional orientadas a la construcción de estructuras que permitieran determinar la arquitectura de las formas detectadas como eventos. A partir de estas estructuras, se obtuvieron los bordes exteriores, los cuales representan las formas que caracterizan a cada evento de incendio. Los resultados del método desarrollado fueron validados a partir de datos simulados y reales. Las simulaciones nos permitieron inferir sobre la efectividad del método independientemente de los datos de entrada, mientras que la validación con datos reales, ayudó a identificar las limitaciones efectivas del producto. La validación con datos reales fue llevada a cabo sobre una amplia representación de incendios a lo largo del área de estudio definida, obteniendo las precisiones sobre la calidad de detección para cada sitio y también sobre la fiabilidad global promedio del producto. De acuerdo a los resultados obtenidos, se espera que el producto de eventos de incendios desarrollado en este trabajo, sirva como una base de implementación para futuros proyectos de desarrollo.

En el capítulo 5 se abordó el desarrollo de una aplicación orientada a la predicción del peligro de propagación de incendios. El objetivo fue poner a prueba el efecto de un simulador de incendios sobre la estimación de peligro de propagación, que a partir de un mínimo de características que definen a las condiciones de un territorio determinado, modele las condiciones de propagación del fuego. El trabajo central de esta aplicación fue desarrollar un modelo de Autómata Celular que permitiera de forma dinámica, representar las condiciones de propagación de un incendio. La aplicación fue desarrollada en IDL en dos etapas. Primero se desarrolló el simulador propiamente dicho, y luego se re diseñó el código para ser ejecutado iterativamente a partir de una regla de ignición establecida mediante una función de amenaza. Esto permitió obtener la acumulación de al menos 1000 incendios simulados. Los resultados obtenidos permitieron confirmar la utilidad de incorporar este tipo de simulaciones a las estimaciones de riesgo basadas únicamente en algebra de bandas píxel a píxel. Se observó, que de acuerdo a la incorporación de efectos tales como viento o cortafuegos, los resultados del peligro de propagación cambian sensiblemente de acuerdo a cada una de las situaciones, lo cual en definitiva comprueba los cambios producidos sobre la dinámica espacial de la propagación del fuego. Se espera que la experiencia obtenida en este trabajo, que solo incorpora de forma básica algunos aspectos dinámicos del comportamiento de un incendio, oriente futuros desarrollos que involucren el diseño de un simulador de incendios, que incorpore todas las variables relacionadas al comportamiento de incendios. Queda evidenciado que con un simulador que incorpore mayores prestaciones sería posible establecer un importante campo de trabajo relacionado a las cuestiones dinámicas del comportamiento de incendios.

En el capítulo 6 se presentó una aplicación orientada a la detección de áreas quemadas y la evaluación de daños a partir de datos SAR y ópticos. Este capítulo se encuadra en el contexto de la tutoría de investigación desarrollada en el marco del plan de estudio de la maestría AEARTE

en el CRPSM de Roma, la cual se presenta en el marco de este trabajo, como una propuesta metodológica a considerar dentro de las aplicaciones destinadas al módulo definido como MoDAQ. La estimación de la superficie quemada y en particular el efecto del fuego sobre la pérdida de biomasa, forma parte de la línea de requerimientos establecidos en este trabajo. El capítulo considera el uso de datos SAR como un medio alternativo al empleo de datos ópticos, los cuales bajo condiciones de nubosidad y otros factores atmosféricos no pueden ser empleados operativamente. El trabajo cuenta con dos enfoques principales, la detección de la superficie quemada, y la estimación de daño. Para el primero, se analizaron técnicas de detección de cambios con el objetivo de evaluar la respuesta de las coberturas quemadas de acuerdo a las diferencias registradas en los valores de retrodispersión para una imagen pre y post fuego. Por su parte, el daño fue estimado considerando un muestreo de las coberturas quemadas también considerando imágenes pre y post fuego y el tipo de polarización empleada (HH/HV). Para ambos enfoques, los mejores resultados fueron obtenidos mediante la polarización cruzada HV, principalmente para coberturas leñosas. Esto indicaría la factibilidad de emplear datos SAR, para la estimación de áreas quemadas y sus efectos sobre la vegetación, al menos para los ambientes estudiados o similares y para las condiciones de observación escogidas. Tales resultados dan pie a considerar que la metodología empleada puede ser ampliada hacia otros tipos de ambientes y en el uso de otros instrumentos SAR. Lo cual finalmente se considera como otro de los temas de trabajo con gran potencial de desarrollo a futuro dentro de un módulo orientado a la detección de áreas quemadas.

Se concluye entonces para el trabajo de tesis en forma general, que el desarrollo de un sistema basado en el uso de software libre y bajo estándares de ingeniería, contribuiría significativamente a la aplicabilidad de la tecnología espacial sobre la fase previa al fenómeno, sobre su detección y sobre su seguimiento en el tiempo. La etapa pre fuego determina un importante componente de prevención orientado a la planificación y manejo, para lo cual la construcción de índices de peligrosidad y riesgo ajustados a las condiciones locales y su puesta a disposición en tiempo y forma, es fundamental. La incorporación de simulaciones de incendios a las estimaciones de riesgo, es otro logro importante que se desprende de este trabajo. Abriendo la posibilidad de ampliar los estudios bajo distintas condiciones e hipótesis.

La detección de eventos de incendios en forma operacional constituye una importante herramienta de seguimiento, lo cual es de vital importancia para el análisis de las zonas que son afectadas recurrentemente. El producto sobre eventos de incendios desarrollado en este trabajo, significa un importante aporte a los métodos convencionales basados en focos de calor, dando un paso adelante hacia la mejor comprensión del fenómeno en términos de la distribución espacial, formas y superficies afectadas.

Pensamos que el trabajo desarrollado sienta las bases para el desarrollo operacional planteado por las organizaciones antes mencionadas. Actualmente existen otras tres tesis en desarrollo por parte de alumnos de la maestría AEARTE en colaboración con la APN, la UNC y el INTA, las cuales se espera que sean parte de los desarrollos a los cuales apunta el presente trabajo. El IG, está trabajando en formar un grupo de alumnos e investigadores dedicado especialmente al

estudio de técnicas y desarrollos que aspiran a seguir avanzando en el desarrollo de un Sistema de Alerta y Respuesta Temprana a Incendios de Vegetación.

Bibliografía

- [1] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2001,” Buenos Aires, 2002.
- [2] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2002,” Buenos Aires, 2003.
- [3] Dirección de Bosques, “Estadística de incendios forestales 2003,” Buenos Aires, 2004.
- [4] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2004,” Buenos Aires, 2005.
- [5] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2005,” Buenos Aires, 2006.
- [6] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2006,” Buenos Aires, 2007.
- [7] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2007,” Buenos Aires, 2008.
- [8] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2008,” Buenos Aires, 2009.
- [9] Dirección de Bosques, “Estadística de Incendios Forestales 2009,” Buenos Aires, 2010.
- [10] USDA, “USDA Agricultural Projections to 2020,” Washington, D.C. 20250-3812, 2011.
- [11] B. J. Stocks, M. A. Fosberg, T. J. Lynham, L. Mearns, B. M. Wotton, Q. Yang, K. Lawrence, G. R. Hartley, J. A. Mason, and D. W. Mckenney, “CLIMATE CHANGE AND FOREST FIRE POTENTIAL,” pp. 1–13, 1998.
- [12] M. D. Flannigan, B. D. Amiro, K. A. Logan, B. J. Stocks, and B. M. Wotton, “Forest Fires and Climate Change in the 21ST Century,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, no. 4, pp. 847–859, 2006.
- [13] W. A. Hoffmann, W. Schroeder, and R. B. Jackson, “Regional feedbacks among fire , climate , and tropical deforestation,” vol. 108, pp. 1–11, 2003.
- [14] C. M. Di Bella, G. Posse, M. E. Beget, M. A. Fischer, N. Mari, and S. Veron, “La teledetección como herramienta para la prevención , seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones,” vol. 17, no. 3, pp. 39–52, 2008.
- [15] CONAE, “Plan Espacial Nacional - Argentina en el Espacio,” 2008. [Online]. Available: <http://www.conae.gov.ar/prensa/Actualizacion2008.pdf>. [Accessed: 23-Oct-2012].

- [16] D. K. Davies, S. Ilavajhala, and C. O. Justice, "Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 1, pp. 72–79, Jan. 2009.
- [17] E. Chuvieco, S. Opazo, W. Sione, H. del Valle, J. Anaya, C. Di Bella, I. Cruz, L. Manzo, G. López, N. Mari, F. González-alonso, F. Morelli, A. Setzer, I. Csiszar, J. A. Kanpandegi, A. Bastarrika, and R. Libonati, "Global burned-land estimation in latin america using MODIS composite data," *Ecological Applications*, vol. 18, no. 1, pp. 64–79, 2008.
- [18] C. H. Key and N. C. Benson, "Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods," 2005.
- [19] J. D. Miller and S. R. Yool, "Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data," vol. 82, pp. 481–496, 2002.
- [20] R. D. X. Pons, "Seguimiento de la regeneración vegetal post- incendio mediante el empleo del NDVI," pp. 1–4, 1999.
- [21] ESA, "ESA software engineering standards," 1991.
- [22] N. Mari, G. Laneve, E. Cadau, and X. Porcasi, "Fire Damage Assessment in Sardinia: the use of ALOS/PALSAR data for post fire effects management," *European Journal of Remote Sensing*, vol. 43, pp. 233–241, 2012.
- [23] E. Chuvieco, I. Aguado, M. Yebra, H. Nieto, J. Salas, M. P. Martín, L. Vilar, J. Martínez, S. Martín, P. Ibarra, J. de la Riva, J. Baeza, F. Rodríguez, J. R. Molina, M. a. Herrera, R. Zamora, and J. De, "Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies," *Ecological Modelling*, vol. 221, no. 1, pp. 46–58, Jan. 2010.
- [24] E. Chuvieco, I. Aguado, and A. P. Dimitrakopoulos, "Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment," vol. 2293, pp. 2284–2293, 2004.
- [25] E. Chuvieco, I. Aguado, D. Cocero, and D. Riaño, "Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, no. 8, pp. 1621–1637, Apr. 2003.
- [26] C. Vega-garcia and E. Chuvieco, "Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain," vol. 90, pp. 1241–1252, 2009.

- [27] M. Yebra, E. Chuvieco, and D. Riaño, "Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment," *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 148, no. 4, pp. 523–536, Apr. 2008.
- [28] D. J. Maguire and P. a. Longley, "The emergence of geoportals and their role in spatial data infrastructures," *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 3–14, Jan. 2005.
- [29] J. H. Scott and R. E. Burgan, "Standard Fire Behavior Fuel Models : A Comprehensive Set for Use with Rothermel ' s Surface Fire Spread Model," no. June, 2005.
- [30] R. Romero-Calcerrada, F. Barrio-Parra, J. D. a. Millington, and C. J. Novillo, "Spatial modelling of socioeconomic data to understand patterns of human-caused wildfire ignition risk in the SW of Madrid (central Spain)," *Ecological Modelling*, vol. 221, no. 1, pp. 34–45, Jan. 2010.
- [31] S. a. Hall and I. C. Burke, "Considerations for characterizing fuels as inputs for fire behavior models," *Forest Ecology and Management*, vol. 227, no. 1–2, pp. 102–114, May 2006.
- [32] X. Zhou, S. Mahalingam, D. Weise, and U. F. Service, "Experimental Modeling of the Effect of Terrain Slope on Marginal Burning," in *Fire safety science-proceedings of the eight international symposium*, 2005, pp. 863–874.
- [33] J. J. Sharples and R. O. Weber, "WIND-TERRAIN EFFECTS ON RUGGED LANDSCAPE FIRE PROPAGATION : LEE-SLOPE CHANNELLING," 2007.
- [34] B. W. Butler, W. R. Anderson, and E. A. Catchpole, "Influence of Slope on Fire Spread Rate," pp. 75–82, 2007.
- [35] J. H. Scott and R. E. Burgan, "Standard Fire Behavior Fuel Models : A Comprehensive Set for Use with Rothermel ' s Surface Fire Spread Model," 2005.
- [36] M. C. Dentoni and M. Muñoz, "Glosario de Términos Relacionados con el Manejo del Fuego," 2001.
- [37] C. L. Riccardi, S. J. Prichard, D. V. Sandberg, and R. D. Ottmar, "Quantifying physical characteristics of wildland fuels using the Fuel Characteristic Classification System This article is one of a selection of papers published in the Special Forum on the Fuel Characteristic Classification System.," *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 37, no. 12, pp. 2413–2420, Dec. 2007.

- [38] R. Mickler and A. Bailey, "Quantifying Wildland Fire Fuel Loading and Fire Risk in Coastal Plain Forests," in *Proceedings of the ASPRS 2005 Annual Conference*, 2005, no. 1972.
- [39] L. Giglio, J. Desloîtres, C. O. Justice, and Y. J. Kaufman, "An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS," vol. 87, pp. 273–282, 2003.
- [40] D. P. Roy, L. Boschetti, C. O. Justice, and J. Ju, "The collection 5 MODIS burned area product — Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product," *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, no. 9, pp. 3690–3707, 2008.
- [41] M. A. Fischer, C. M. Di Bella, and E. G. Jobbágy, "Fire patterns in central semiarid Argentina," *Journal of Arid Environments*, vol. 78, pp. 161–168, 2012.
- [42] T. Loboda, "Reconstruction of fire spread within wildland fire events in Northern Eurasia from the MODIS active fire product," *Global and Planetary Change*, vol. 56, 2006.
- [43] L. A. Hardtke, H. F. D. E. L. Valle, and W. Sione, "Spatial distribution of wildfire risk in the Monte biome (Patagonia , Argentina) Methods and datasets Study area," no. November, pp. 588–599, 2011.
- [44] L. B. Lentile, Z. Holden, A. M. S. Smith, M. Falkowski, A. T. Hudak, P. Morgan, S. A. Lewis, P. E. Gessler, and N. C. Benson, "Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects," *International Journal Of Wildland Fire*, pp. 319–345, 2006.
- [45] L. Boschetti, H. D. Eva, P. A. Brivio, and J. M. Gre, "Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products," vol. 31, pp. 2–5, 2004.
- [46] V. Mallet, D. E. Keyes, and F. E. Fendell, "Modeling wildland fire propagation with level set methods," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 57, no. 7, pp. 1089–1101, Apr. 2009.
- [47] W. Mell, A. Maranghides, R. McDermott, and S. L. Manzello, "Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees," *Combustion and Flame*, vol. 156, no. 10, pp. 2023–2041, 2009.
- [48] R. D. Stratton, "Guidance on Spatial Wildland Fire Analysis : Models , Tools , and Techniques," *Techniques*, no. December, p. 15, 2006.
- [49] A. Torazza, "Estado del arte del modelo matemático Autómatas Celulares," Falda del Carmen, Córdoba, 2012.

- [50] M. A. Finney, D. Q. Ñ, M. Alexander, P. Andrews, J. Beck, B. Keane, and J. Scott, "FARSITE : Fire Area Simulator — Model Development and Evaluation," *Evaluation*, vol. Research P, no. March, p. 47, 1998.
- [51] V. Wagner, "Development and structure of the Canadian forest fire weather index system," Chalk River, Ontario, 1987.
- [52] H. Anderson, "Aids to determining fuel models for estimating fire behavior," *The Bark Beetles, Fuels, and Fire ...*, no. April, 1982.
- [53] P. Ceccato, S. Flasse, S. Tarantola, S. Jacquemoud, and J.-M. Grégoire, "Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain," *Remote Sensing of Environment*, vol. 77, no. 1, pp. 22–33, Jul. 2001.
- [54] V. Wagner, "A METHOD OF COMPUTING FINE FUEL Mos," Chalk River, Ontario, 1977.
- [55] A. Bastarrika and E. Chuvieco, "Automatic Burned Land Mapping From MODIS Time Series Images : Assessment in Mediterranean Ecosystems," vol. 49, no. 9, pp. 3401–3413, 2011.
- [56] C. O. Justice, L. Giglio, S. Korontzi, J. Owens, J. T. Morisette, and D. Roy, "The MODIS fire products," *Remote Sensing of Environment*, vol. 83, pp. 244–262, 2002.
- [57] C. M. Di Bella, E. G. Jobbágy, J. M. Paruelo, and S. Pinnock, "Continental fire density patterns in South America," pp. 192–199, 2006.
- [58] J. M. Paruelo and J. P. Guerschman, "Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo," pp. 14–23, 2003.
- [59] M. R. Zak, M. Cabido, and J. G. Hodgson, "Do subtropical seasonal forests in the Gran Chaco, Argentina, have a future?," *Biological Conservation*, vol. 120, no. 4, pp. 589–598, 2004.
- [60] S. S. Building, "Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazonia," vol. 2005, pp. 1–14, 2008.
- [61] W. J. Bond and J. E. Keeley, "Fire as a global ' herbivore ' : the ecology and evolution of flammable ecosystems," vol. 20, no. 7, 2005.
- [62] E. Chuvieco and E. S. Kasischke, "Remote sensing information for fire management and fire effects assessment," vol. 112, pp. 1–8, 2007.
- [63] M. Schultz, F. Mouillot, C. Yue, P. Cadule, and P. Ciais, "Fire_ climate change initiative_D1.1 - User Requirements Document," 2011.

- [64] Y. Kaufman and C. Justice, "Algorithm Technical Background Document," pp. 1–77, 1998.
- [65] A. Setzer, "Monitoring of Vegetation Fires in Brazil," 2005.
- [66] J. Dozier, "A Method for Satellite Identification of Surface Temperature Fields of Subpixel Resolution," vol. 229, 1981.
- [67] W. Schroeder, E. Prins, L. Giglio, I. Csiszar, C. Schmidt, J. Morisette, and D. Morton, "Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM + data," vol. 112, pp. 2711–2726, 2008.
- [68] I. Csiszar, J. Morisette, L. Giglio, N. Goddard, and S. Flight, "Validation of the MODIS active fire products in Siberia with coincident ASTER data," vol. 1, no. May 2001, p. 2002, 2002.
- [69] J. Morisette, L. G. Nasa, G. Space, I. Csiszar, and I. Moran, "Validation of the MODIS active fire product by coincident ASTER observations in Southern Africa ASTER : Advanced Spaceborne Thermal," p. 21, 2002.
- [70] J. T. Morisette, L. Giglio, I. Csiszar, A. Setzer, W. Schroeder, D. Morton, and C. O. Justice, "Validation of MODIS Active Fire Detection Products Derived from Two Algorithms," vol. 9, no. 9, 2005.
- [71] A. Hudak, J. Evans, G. I. S. Analyst, and P. Morgan, "Field validation of burned area remote clasification (BARC) products for the purpose of rapid response," 2004.
- [72] O. Arino, S. Plummer, E. Bilgili, E. Chuvieco, M. Cristaldi, A. C. Montes, C. Roque, H. Eva, R. H. Fraser, A. Hoffmann, S. Kuntz, S. Langaas, J. Marsden, M. Michou, N. Raisbeck, F. Siegert, M. Steber, J. Stibig, B. Stocks, E. S. Agency, K. Consultants, M. Snc, T. Project, A. Arbor, S. Remote, and S. Services, "ALONG TRACK SCANNING RADIOMETER WORLD FIRE ATLAS Validation of the 1997-98 Active Fire Product," 1997.
- [73] G.-F. Implementation, C. Wgcv, L. Product, and V. Subgroup, "White paper to establish a set of validation sites for global fire and burn scar products – a joint activity of," no. 2, 2001.
- [74] P. Oliva, S. Jurdao, and J. Martínez, "VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN DE LOS PRODUCTOS ACTIVOS EN LA ESPAÑA PENINSULAR Y BALEARES EN EL AÑO 2003 Validation and comparison of modis and aatsr active fire products in Spain in 2003," pp. 141–150, 2008.
- [75] I. A. Csiszar, J. T. Morisette, and L. Giglio, "Validation of Active Fire Detection From Moderate-Resolution Satellite Sensors : The MODIS Example in Northern Eurasia," vol. 44, no. 7, pp. 1757–1764, 2006.

- [76] L. Giglio, "Characterization of the tropical diurnal fire cycle using VIRS and MODIS observations," vol. 108, pp. 407–421, 2007.
- [77] E. M. Prins, J. M. Feltz, W. P. Menzel, and D. E. Ward, "An overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America," *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. D24, pp. 31821–31835, 1998.
- [78] L. Giglio, G. R. Van Der Werf, J. T. Randerson, and G. J. Collatz, "Global estimation of burned area using MODIS active fire observations," 2005.
- [79] P. Brivio and J. Gregoire, "An automatic clustering technique applied to the study of vegetation fire patterns distribution in the African continent," *Geoscience and Remote ...*, pp. 112–114, 1995.
- [80] R. Bivand and N.- Bergen, "Introduction to representing spatial objects in R Spatial data in R Import / export," no. September, 2012.
- [81] P. Teetor, *R Cookbook*, March 2011. O'Reilly Media, Inc., 2011.
- [82] W. N. Venables and D. M. Smith, *An Introduction to R*, vol. 1. 2012.
- [83] E. Pebesma and R. S. Bivand, "S Classes and Methods for Spatial Data : the sp Package," pp. 1–21, 2005.
- [84] A. Baddeley and R. Turner, "spatstat: An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns," *Journal of Statistical software*, vol. 12, no. 6, 2005.
- [85] and R. A. S. Hansen, M. C., R. S. DeFries, J. R. G. Townshend, M. Carroll, C. Dimiceli, "Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm," *Earth Interactions*, vol. 7, no. 10, 2003.
- [86] A. Baddeley, "Analysing spatial point patterns in R," 2010.
- [87] S. Byers and A. E. Raftery, "Nearest-neighbor clutter removal for estimating features in spatial point pro ...," 1998.
- [88] A. Bastarrika, E. Chuvieco, and M. P. Martín, "Remote Sensing of Environment Mapping burned areas from Landsat TM / ETM + data with a two-phase algorithm : Balancing omission and commission errors," *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 4, pp. 1003–1012, 2011.
- [89] E. Chuvieco, "Assessment of the potential of SAC-C / MMRS imagery for mapping burned areas in Spain," vol. 92, pp. 414–423, 2004.

- [90] A. Vázquez, J. M. Cuevas, and F. González-alonso, "Comparison of the use of WiFS and LISS images to estimate the area burned in a large forest fire," *International Journal of ...*, vol. 22, no. 5, pp. 901–907, 2001.
- [91] F. González-alonso and S. Merino-de-miguel, "Integration of AWiFS and MODIS active fire data for burn mapping at regional level using the Burned Area Synergic Algorithm (BASA)," pp. 404–414, 2009.
- [92] T. Loboda, K. J. O. Neal, and I. Csiszar, "Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data," vol. 109, pp. 429–442, 2007.
- [93] D. Riaño, "Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using Pathfinder, Noaa-nasa," pp. 40–50, 2007.
- [94] D. P. Roy, P. E. Lewis, and C. O. Justice, "Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data — a bi-directional reflectance model-based expectation approach," vol. 83, pp. 263–286, 2002.
- [95] A. M. O. Sousa, J. M. C. Pereira, and J. M. N. Silva, "Evaluating the performance of multitemporal image compositing algorithms for burned area analysis," pp. 1219–1236, 2003.
- [96] H. Eva and E. F. Lambin, "Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions : Sampling Issues and Multisensor Approach," vol. 315, no. January, pp. 292–315, 1998.
- [97] A. I. Sukhinin, N. H. F. French, E. S. Kasischke, J. H. Hewson, A. J. Soja, I. A. Csiszar, E. J. Hyer, T. Loboda, S. G. Conard, V. I. Romasko, E. A. Pavlichenko, S. I. Miskiv, and O. A. Slinkina, "Corrigendum to bAVHRR-based mapping of fires in Russia : New products for fire management and carbon cycle studiesQ [Remote Sensing of Environment , 93 , 546 – 564]," vol. 94, p. 4991, 2005.
- [98] L. Boschetti and D. P. Roy, "International Global Burned Area Satellite Product Validation Protocol Part I – production and standardization of validation reference data (to be followed by part II – accuracy reporting)," vol. 1998, 2006.
- [99] L. Boschetti, D. Roy, and C. Justice, "Global Burned Area Product Validation : a few relevant issues The CEOS-Cal Val Burned Area Product Validation Protocol," 2011.
- [100] L. Giglio, T. Loboda, D. P. Roy, B. Quayle, and C. O. Justice, "Remote Sensing of Environment An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor," *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 2, pp. 408–420, 2009.

- [101] R. J. Renka, "Algorithm 751; TRIPACK: a constrained two-dimensional Delaunay triangulation package," *ACM Transactions on Mathematical Software*, vol. 22, no. 1, pp. 1–8, Mar. 1996.
- [102] R. Dyer, H. Zhang, and T. Möller, "Voronoi-Delaunay duality and Delaunay meshes," *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Solid and physical modeling*, p. 415, 2007.
- [103] H. Edelsbrunner, "Triangulations and meshes in computational geometry," *Acta Numerica*, vol. 9, pp. 133–213, 2000.
- [104] O. Devillers, "Improved Incremental Randomized Delaunay Triangulation," *Search*, vol. Proceeding, p. 19, 1999.
- [105] L. Giglio, "MODIS Collection 4 Active Fire Product User 's Guide Version 2 . 3," no. February, 2007.
- [106] W. Schroeder, I. Csiszar, and J. Morissette, "Quantifying the impact of cloud obscuration on remote sensing of active fires in the Brazilian Amazon," vol. 112, pp. 456–470, 2008.
- [107] F. Aurenhammer, "Voronoi Diagrams — A Survey of a Fundamental Data Structure," vol. 23, no. 3, 1991.
- [108] H. Edelsbrunner, D. G. Kirkpatrick, and R. Seidel, "On the shape of a set of points in the plane," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 29, no. 4, pp. 551–559, 1983.
- [109] B. Pateiro-López and A. Rodríguez-Casal, "Generalizing the convex hull of a sample: the R package alphahull," *Journal of Statistical software*, no. 1988, 2010.
- [110] D. Roy and L. Boschetti, "MODIS Collection 5 Burned Area Product User 's Guide," *Area*, vol. Version 1., no. September, pp. 1–12, 2008.
- [111] D. Stroppiana, G. Bordogna, P. Carrara, M. Boschetti, L. Boschetti, and P. A. Brivio, "A method for extracting burned areas from Landsat TM/ETM+ images by soft aggregation of multiple Spectral Indices and a region growing algorithm," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 69, no. 0, pp. 88–102, 2012.
- [112] A. M. S. Smith, N. A. Drake, M. J. Wooster, A. T. Hudak, Z. A. Holden, and C. J. Gibbons, "Production of Landsat ETM+ reference imagery of burned areas within Southern African savannahs: comparison of methods and application to MODIS," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, no. 12, pp. 2753–2775, 2007.
- [113] A. Bastarrika Izagirre, "AUTOMATIC BURNED AREA MAPPING SOFTWARE (ABAMS) PRELIMINARY DOCUMENTATION Version Beta 6."

- [114] W. Von Niessen and A. Blumen, "Dynamic simulation of forest fires," *Can J For Res*, vol. 18, no. 6, pp. 805–812, 1988.
- [115] R. E. Keane, J. L. Garner, K. M. Schmidt, J. P. Menakis, and M. A. Finney, *Development of Input Data Layers for the FARSITE Fire Growth Model for the Selway-Bitterroot Wilderness*. 1998.
- [116] D. Riaño, P. Vaughan, E. Chuvieco, P. J. Zarco-tejada, S. L. Ustin, and S. Member, "Estimation of Fuel Moisture Content by Inversion of Radiative Transfer Models to Simulate Equivalent Water Thickness and Dry Matter Content : Analysis at Leaf and Canopy Level," vol. 43, no. 4, pp. 819–826, 2005.
- [117] M. Yebra, E. Chuvieco, and D. Rian, "Investigation of a method to estimate live fuel moisture content from satellite measurements in fire risk assessment," p. 2006, 2006.
- [118] M. García, E. Chuvieco, H. Nieto, and I. Aguado, "Combining AVHRR and meteorological data for estimating live fuel moisture content," *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, no. 9, pp. 3618–3627, Sep. 2008.
- [119] G. Laneve, M. Jahjah, F. Ferrucci, and F. Battazza, "SIGRI Project: The development of the fire vulnerability index.," Rome, 2001.
- [120] L. Bodroži, D. Stipani, and M. Šeri, "Forest fires spread modeling using cellular automata approach," 2006.
- [121] I. Karafyllidis, "Design of a dedicated parallel processor for the prediction of forest fire spreading using cellular automata and genetic algorithms," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 17, no. 1, pp. 19–36, Feb. 2004.
- [122] S. Zhao, "Simulation of Mass Fire-Spread in Urban Densely Built Areas Based on Irregular Coarse Cellular Automata," *Fire Technology Fire Technol*, vol. 47, no. 3. pp. 721–749, 2011.
- [123] S. Bajocco and C. Ricotta, "Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): which land-cover classes do wildfires prefer?," *Landscape Ecology*, vol. 23, no. 2, pp. 241–248, Nov. 2007.
- [124] L. L. BourgeauChavez, P. A. Harrell, E. S. Kasischke, and N. H. F. French, "The detection and mapping of Alaskan wildfires using a spaceborne imaging radar system," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 2, pp. 355–373, 1997.

- [125] D. R. Cahoon, B. J. Stocks, J. S. Levine, and J. M. Pierson, "Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia," *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no. D9, pp. 18627–18638, 1994.
- [126] E. Kasischke and N. French, "Monitoring of wildfires in boreal forests using large area AVHRR NDVI composite image data," *Remote Sensing of Environment*, vol. 71, no. September 1992, pp. 61–71, 1993.
- [127] E. S. Kasischke, J. M. Melack, and M. Craig Dobson, "The use of imaging radars for ecological applications—A review," *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, no. 2, pp. 141–156, Feb. 1997.
- [128] M. A. Tanase, M. Santoro, J. De Riva, F. Pérez-cabello, and T. Le Toan, "Sensitivity of X-, C-, and L-Band SAR Backscatter to Burn Severity in Mediterranean Pine Forests," *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing.*, vol. 48, pp. 1–13, 2010.
- [129] T. Le Toan and A. Beaudoin, "Relating forest biomass to SAR data," *Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no. 2, pp. 403–411, 1992.
- [130] K. Ishii, M. Shimada, O. Isoguchi, and K. Isono, "Detecting an area affected by forest fires using ALOS PALSAR," no. 1. p. 2, 2009.
- [131] T. Le Toan, S. Quegan, and I. Woodward, "Relating radar remote sensing of biomass to modelling of forest carbon budgets," *Climatic Change*, pp. 379–402, 2004.
- [132] D. Hoekman, "Monitoring tropical forests using synthetic aperture radar," *Indonesian Radar Experiment*, 2000.

Apéndice

PHASES	UR	UR/R	SR	SR/R	AD	AD/R	DD	DD/R	TR	OM	
ITEMS	USER REQUIREMENTS DEFINITION		SOFTWARE REQUIREMENTS DEFINITION		ARCHITECTURAL DESIGN		DETAILED DESIGN AND PRODUCTION		TRANSFER	OPERATIONS AND MAINTENANCE	
MAJOR ACTIVITIES	<ul style="list-style-type: none"> determination of operational environment identification of user requirements 		<ul style="list-style-type: none"> construction of logical model identification of software requirements 		<ul style="list-style-type: none"> construction of physical model definition of major components 		<ul style="list-style-type: none"> module design coding unit tests integration tests system tests 		<ul style="list-style-type: none"> installation provisional acceptance tests 	<ul style="list-style-type: none"> final acceptance tests operations maintenance of code and documentation 	
DELIVERABLE ITEMS arrow implies under change control	User Requirements Document URD	→	Software Requirements Document SRD	→	Architectural Design Document ADD	→	Detailed Design Document DDD Code SUM Software User Manual	→	Software Transfer Document STD	→	Project History Document PHD
REVIEWS			+ technical reviews	+ +	+ technical reviews	+ +	+ technical reviews	+ +	+ technical reviews		
MAJOR MILESTONES			▲ URD approved		▲ SRD approved		▲ ADD approved		▲ code/DDD/SUM approved	▲ STD delivered provisional acceptance	▲ PHD delivered final acceptance

Figura 54: Ciclo de vida del software de acuerdo a la norma ESA-PSS-05-0

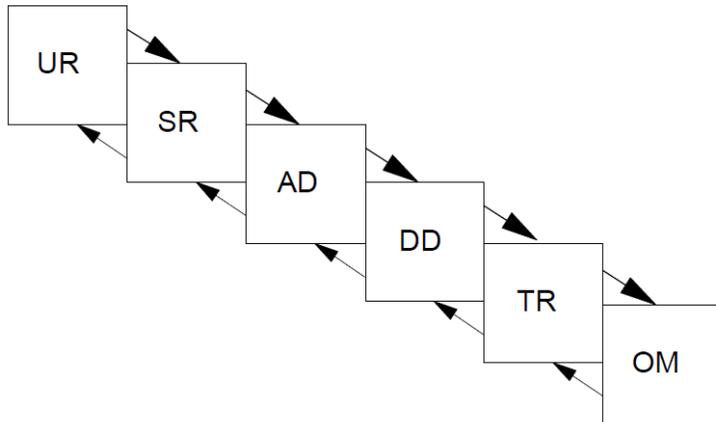


Figura 55: El ciclo de vida tipo cascada.