

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“UTILIZACIÓN DEL ÍNDICE METEOROLÓGICO DE INCENDIOS
FORESTALES (FIRE WEATHER INDEX) EN EL DEPARTAMENTO
DE CUSCO”**

Presentada por:

JULIO FRANCISCO LAU GUERRA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“UTILIZACIÓN DEL ÍNDICE METEOROLÓGICO DE INCENDIOS
FORESTALES (FIRE WEATHER INDEX) EN EL DEPARTAMENTO
DE CUSCO”**

Presentada por:

JULIO FRANCISCO LAU GUERRA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Sc. Eusebio Cisneros Tarmeño
PRESIDENTE

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Mg. Sc. Julio Arakaki Kiyari
MIEMBRO

Mg. Sc. Victoria Calle Montes
ASESORA

Dra. Maria Isabel Manta Nolasco
Co ASESORA

DEDICATORIA

Estas páginas están dedicadas a mis padres, a ellos les entrego cada uno de mis logros y sueños.

AGRADECIMIENTO

Me gustaría que estas líneas sirvieran para expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo:

A mi familia y amigos por su apoyo continuo.

A la Mg. Sc. Victoria Calle Montes, por regalarme en cada clase y conversación que tuvimos la oportunidad de enamorarme de mi carrera.

A la Dra. Maria Isabel Manta Nolasco, por proporcionarme las herramientas necesarias para concretar este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCION.....	1
1.1	JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION	3
1.2	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION	8
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	9
2.1	LOS INCENDIOS FORESTALES	9
2.2	ELEMENTOS METEOROLOGICOS AFINES A UN INCENDIO FORESTAL.....	10
	ELEMENTOS DE INICIO DEL FUEGO	
2.2.1	PRECIPITACIÓN	10
2.2.2	HUMEDAD RELATIVA	11
2.2.3	TEMPERATURA DEL AIRE	12
	ELEMENTOS DE PROPAGACIÓN DEL FUEGO	
2.2.4	VIENTO	13
2.3	TOPOGRAFIA	14
2.4	COMBUSTIBLE.....	14
2.5	ÍNDICES DE INCENDIOS FORESTALES.....	15
2.6	ÍNDICE METEOROLÓGICO CANADIENSE.....	15
2.7	HISTORIA DEL “FIRE WEATHER INDEX”	16
2.8	ÁREA DE ESTUDIO	17
2.8.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	17
2.8.2	CONDICIÓN POBLACIONAL.....	18
2.8.3	ESTRUCTURA ECONÓMICA	19
2.9	CLIMATOLOGÍA.....	20
2.9.1	CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA REGIONAL	20
2.9.2	CLIMATOLOGÍA CUSQUEÑA.....	21

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 ESTRUCTURA DEL “FIRE WEATHER INDEX”	24
3.2 CÓDIGOS DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE.....	25
3.2.1 CÓDIGO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE FINO (FFMC)	25
3.2.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MANTILLO (DMC).....	28
3.2.3 CÓDIGO DE SEQUIA (DC)	30
3.3 ÍNDICES DE FUEGO	32
3.3.1 ÍNDICE DE PROPAGACIÓN INICIAL (ISI)	32
3.3.2 ÍNDICE DE COMBUSTIBLE DISPONIBLE (BUI).....	33
3.3.3 ÍNDICE METEOROLÓGICO DE INCENDIOS FORESTALES (FWI)	33
3.4 HABILITACIÓN DEL CÓDIGO FUENTE	34
3.5 VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO.....	37
3.6 DATA METEOROLÓGICA.....	37
3.7 GEORREFERENCIACIÓN Y EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS.....	41
3.8 PROCESAMIENTO DEL CÓDIGO Y ESTRUCTURACIÓN DE DATOS	50
3.9 CRITERIO POR EXTENSIÓN PARA LA ASIGNACIÓN DE CUADRANTES.....	50
3.10 CRITERIO POR INCIDENCIA DE INCENDIO PARA LA ASIGNACIÓN DE CUADRANTES.....	50
3.11 ESPACIO TEMPORAL DE INCENDIOS	51
3.12 INTERVALOS DE CLASES	52
3.13 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE DE LA VARIABLE FWI.....	54
3.14 PRUEBA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL.....	54
3.15 PRUEBA DE DISTRIBUCIÓN CHI CUADRADO.....	54
3.16 CLASIFICACIÓN DE LOS INCENDIOS EN BASE AL ÍNDICE FWI.....	55
3.17 ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DEL MODELO	55

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1 CÓDIGO FUENTE.....	57
4.2 VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO FUENTE.....	61
4.3 DESCARGA DE DATA METEOROLÓGICA DEL MODELO ERA-INTERIM.....	62
4.4 EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS	63
4.5 PROCESAMIENTO DE DATOS	66
4.6 CRITERIO DE ELECCIÓN POR EXTENSIÓN.....	67
4.7 CRITERIO POR INCIDENCIA	68
4.7.1 ACOMAYO	68
4.7.2 ANTA	68
4.7.3 CANAS – CANCHIS	69
4.7.4 CALCA.....	70
4.7.5 CUSCO.....	70
4.7.6 CHUMBIVILCA	71
4.7.7 ESPINAR	71
4.7.8 LA CONVENCIÓN	71
4.7.9 PARURO.....	73
4.7.10 PAUCARTAMBO	73
4.7.11 QUISPICANCHI.....	74
4.7.12 URUBAMBA	75
4.8 GRILLAS REPRESENTATIVAS	75
4.9 ESPACIO TEMPORAL DE INCENDIOS	76
4.10 INTERVALOS DE CLASES	78
4.11 ANÁLISIS GEOESPACIAL DE LOS INCENDIOS FORESTALES DENTRO DE CUSCO.....	88
4.12 MEDIDAS ESTADÍSTICAS DEL “FWP”.....	90
4.13 PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	95

4.14 PRUEBA DE CHI CUADRADO.....	96
4.15 TABLA DE CONTINGENCIA.....	97
4.16 ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO	99
V. CONCLUSIONES.....	104
VI. RECOMENDACIONES	106
VII. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	107
VIII.ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Registro del número de incendios forestales registrados cada año y por departamentos.....	4
Tabla 2: Censo 2007 Población, Superficie, Densidad y Ubicación geográfica de las provincias de Cusco.....	18
Tabla 3: Valor agregado Bruto 2015 de las actividades económicas de Cusco	19
Tabla 4: Recuadro descriptor de las principales características del Era-Interim.....	39
Tabla 5: Definición de las líneas de tiempo	51
Tabla 6: Rangos cuantitativos y cualitativos del Fire Weather Index	53
Tabla 7: Relación de casillas con provincias cusqueñas	67
Tabla 8: Número de incendios registrados por temporada y mes (1995-2014).....	76
Tabla 9: Número de incendio por provincia. Periodo 1995-2014	77
Tabla 10: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Serie”	86
Tabla 11: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Verano”	86
Tabla 12: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Otoño”	87
Tabla 13: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Invierno”	87
Tabla 14: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Primavera”	88
Tabla 15: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Serie".....	91
Tabla 16: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Verano".....	91

Tabla 17: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Otoño"	92
Tabla 18: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Invierno"	92
Tabla 19: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Primavera"	92
Tabla 20: Medidas de distribución del FWI en la línea "Serie"	93
Tabla 21: Medidas de distribución del FWI en la línea "Verano"	93
Tabla 22: Medidas de distribución del FWI en la línea "Otoño"	93
Tabla 23: Medidas de distribución del FWI en la línea "Invierno"	94
Tabla 24: Medidas de distribución del FWI en la línea "Primavera"	94
Tabla 25: Estadístico de posición percentil 95	94
Tabla 26: Resumen de contrastes prueba de Kolmogorov-Smirnov	95
Tabla 27: Resumen de contrastes prueba de Chi-Cuadrado	96
Tabla 28: Distribución de frecuencias categóricas del "FWI" para los días donde se registró incendio	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Registro anual de incendios forestales en el departamento de Cusco.....	5
Figura 2: Número de incendios forestales por departamentos (1995-2014)	6
Figura 3: Número de incendios forestales por meses registrados 1995-2014).....	6
Figura 4: División política de las 13 provincias del departamento de Cusco	17
Figura 5: Registro mensual de precipitación diferenciada para la parte alta y baja de la cuenca del río Urubamba.....	22
Figura 6: Ciclo anual de temperaturas máximas y mínimas para la parte alta y baja de la cueca del rio Urubamba.....	23
Figura 7: Estructura del índice Meteorológico de Incendios Forestales (FWI)	24
Figura 8: Representación gráfica de los horizontes del suelo y su relación con los códigos de humedad de combustible según su profundidad.....	25
Figura 9: Ejemplo de cuadrícula para un modelo climático.....	38
Figura 10: Propiedades de los archivos descargados	41
Figura 11: Edición de datos geográficos, selección de solo las provincias de Cusco	42
Figura 12: Ruta de trabajo principal en OpenGrads.....	43
Figura 13: Archivos en la carpeta SampleDatasets	44
Figura 14: Ejecutor principal del proceso de extracción de información meteorológica ...	45
Figura 15: Ruta de trabajo secundario en OpenGrads	46
Figura 16: Archivo descriptor (y79.gs) con la orden de llamado a los 42 sub-scrits	47
Figura 17: Archivo con las órdenes de exportación de información meteorológica.....	49
Figura 18: Desarrollo de los Raster “FWI” delimitados para Cusco.....	56
Figura 19: Programa de cálculo del Índice Meteorológico de Incendios Forestales.....	60
Figura 20: Validación del código fuente en base la comparación de tres resultados satisfactorios	61
Figura 21: Plataforma de descarga de datos meteorológicos del proveedor ECMWF.....	62
Figura 22: Mapa político del departamento de cusco dividido en 42 cuadrantes de estudio.....	63
Figura 23: Mapa del área de estudio evaluado en cuadrantes	64
Figura 24: Ruta de trabajo que contiene los 42 archivos meteorológicos del año 1979	65
Figura 25: Carpeta “Excel_Años” el cual contiene 37 archivos Excel	66
Figura 26: Registro de incendios por distritos en los cuadrantes “g18” y “g25”	68

Figura 27: Mapa con los registros de incendios para el cuadrante “g33”	69
Figura 28: Número de incendios por distritos en la provincia de Cusco (1995-2014)	70
Figura 29: Número de incendios forestales registrados en los distritos de la provincia de La Convención (1995-2014)	72
Figura 30: Mapa con los registros de incendios para el distrito de La Convención.....	72
Figura 31: Mapa con los registros de incendios para el distrito de Paruro.....	73
Figura 32: Registro de incendios por distritos. Cuadrantes “g25”, “g32” y “g39”	74
Figura 33: Registro de incendios por distritos en los cuadrantes “g18” y “g25”	75
Figura 34: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Serie”	78
Figura 35: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Verano”	79
Figura 36: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Otoño”	80
Figura 37: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Invierno”	81
Figura 38: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Primavera”	82
Figura 39: Mapas de densidad e intensidad de incendios forestales en el departamento de Cusco	89
Figura 40: Distribución de las frecuencias absolutas de incendios forestales categorizados según el cuadrante estudiado y entre los meses con registro.....	98
Figura 41: Análisis multianual de valores promedios mensuales del “FWI” para todas las grillas analizadas desde 1979 al 2015 empleando como datos meteorológicos los resultados del ERA-Interim en superficie	99
Figura 42: Distribución de las frecuencias absolutas categorizadas a partir del promedio mensual del “FWI” en las 7 grillas representativas de Cusco dentro del periodo de estudio 1979-2015	102

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco del día 12 de Octubre del 2010 en donde informan sobre damnificados por efectos de un incendio forestal.....	111
Anexo 2: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco del día 20 de Julio del 2011 donde explica la perdida de áreas de cultivo por efectos de un incendio forestal	112
Anexo 3 Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco del día 2 de Setiembre del 2008 en donde se explica la perdida de cabezas de ganado por efecto de un incendio forestal	113
Anexo 4: Recorte periodístico del diario “El Diario del Cuzco” del día 21 de Setiembre del 2010 donde se informa sobre el riesgo de incendio en la zona arqueológica de Macchu Picchu	114
Anexo 5: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco donde se informa sobre el impacto en la salud de la población producido por la humareda generada en un incendio forestal	115
Anexo 6: Mapas climáticos de temperatura del aire (Izquierda) y precipitación (derecha) para la provincia de Cusco. Modificación en base a los resultados propuestos por SENAMHI en 2013.....	116
Anexo 7: Datos referenciales, Van Wagner 1985 “Equation and Fortran Program for the Canadian Forest Fire Weather Index System”, pag 17.....	117
Anexo 8: Registro de incendios forestales recopilados desde 1995 al 2014 (Parte 1).....	118
Anexo 9: Registro de incendios forestales recopilados desde 1995 al 2014 (Parte 1).....	119
Anexo 10: Mapa de curvas de nivel Cuenca del rio Urubamba, se evidencia una clasificación de hasta 3 zonas. Bajo nivel altitudinal en la zona norte, medios en el centro y altos en la zona sur donde nace la cuenca	120

RESUMEN

Los incendios forestales en el Perú constituyen una problemática social, económica y ambiental recurrente cada año, teniendo su foco principal en la provincia de Cusco donde se ha registrado el mayor número de incidentes hasta la fecha.

La temporada de incendios coinciden justamente con el invierno cusqueño, cuando las condiciones meteorológicas son las más favorables para el inicio, desarrollo y expansión del fuego. Para poder categorizar la intensidad del incendio considerando la meteorología como referente, se plantea aplicar el índice meteorológico de incendios forestales “Fire Weather Index” como mecanismo de respuesta. La manera cualitativa (Bajo, Moderado, Alto, Muy Alto y Extremo) de expresar el peligro hace que sea más fácil su manejo por parte de autoridades y personal de respuesta.

De esta forma se realiza un estudio espacial definido por las cuadrículas del re-análisis atmosférico ERA-Interim dentro de Cusco; esta fuente de datos meteorológicos será empleada debido a que los registros de estaciones físicas en superficies son de acceso limitado. La bondad de recurrir al modelo es poder tener acceso libre a una serie de datos diarios desde 1979 al 2015, generando de esta forma una “climatología del fuego”. Para poder comparar el índice con la realidad de incendios se evaluó desde 1995 al 2014 ya que solo entre estos años se tiene un registro adecuado de los incidentes.

Al finalizar este trabajo se tendrá caracterizada la temporada de incendios y las zonas más propensas, todo ello bajo el criterio del índice.

Palabras clave: Incendio forestal, Índice meteorológico, ERA-Interim, Cusco.

SUMMARY

Wildfires in Peru are social, economic and environmental annually recurring problems. They have their main focus in the province of Cusco, where the highest number of incidents were registered to date. Fire season fits precisely with the winter, when weather conditions are more favorable for the initiation, development and spread of fire. In order to categorize the intensity of the fire considering meteorology as a reference, we propose to apply the forest fire weather index "Fire Weather Index" as a response mechanism. The qualitative manner used to express the danger (Low, Moderate, High, Very High and Extreme) makes it easier to handle by authorities and responders.

Thus, we defined spatial study by the grids of the re-analysis atmospheric ERA-Interim in Cusco; this source of meteorological data will be used because the physical records stations are limited access areas. The goodness of using the model is to have free access to a series of daily data from 1979 to 2015, so that a "climate of fire" can be developed. In order to compare the index with the reality of fires, we evaluated data from 1995 to 2014 because only between these years we have an adequate record of incidents.

At the end, we characterized the fire season and the most prone areas, all under the index's criteria.

Keywords: Forest fire, weather index, ERA-Interim, Cusco.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el concepto de fuego se entiende como una reacción química de transformación de un combustible en forma de luz y calor, pero hace miles de años este fenómeno era considerado como una representación divina en casi todos los pueblos de la antigüedad por lo que comenzaría un largo y complejo proceso de ensayos y estrategias, a través del cual se habría ido practicando y consolidando el manejo del fuego.

Pero tal proceso siempre estaría ligado al peligro de manipularlo como herramienta de trabajo y en muchas ocasiones se registró diversos tipos de incidentes, uno de estos son los incendios forestales los cuales son fuegos que se expanden sin control a lo largo de un territorio clasificado como forestal o con cubierta vegetal. El comportamiento en estos incendios se basa en la dinámica de tres componentes (meteorología, topografía y combustibles) que conforman el triángulo de fuego forestal.

El Perú presenta condiciones propicias para el inicio y desarrollo de incendios forestales, se ubica dentro de la franja tropical del hemisferio sur, siendo éste un lugar característico de intensa radiación y precipitación abundante, pero debido a factores topográficos, corrientes oceánicas diferenciadas y sistemas atmosféricos dominantes se encontrará a lo largo de la costa, sierra y selva una amalgama de microclimas. En estas dos últimas regiones del país es donde estadísticamente se registran la mayor cantidad de incendios forestales, siendo el departamento del Cusco el de mayor incidencia de estos fenómenos.

La acumulación constante de material combustible y condiciones meteorológicas de secado, vendrían a ser los principales desencadenantes de riesgo. Es muy común encontrarse con quemados de residuos agropecuarios y empleo del fuego como mecanismo de expansión agrícola en donde sin el debido cuidado y prevención pueda que el fuego se descontrola y genere daño a la flora y fauna.

Sin un manejo adecuado, pueden desencadenarse grandes incendios que comprometan a la reducción de áreas boscosas, graves daños económicos y ecológicos que conduzcan a la degradación de los suelos y desertización del paisaje peruano, a la disminución de la calidad del recurso hídrico y por último provocar contaminación atmosférica (Manta y Leon 2004).

La literatura acerca de los índices de incendios forestales muestra diferentes enfoques, pudiendo éstos ser usados para la determinación del riesgo y peligro. Los mencionados métodos tienden a emplear como datos bases a los parámetros meteorológicos, los cuales determinan la sucesión de periodos secos y húmedos, y en consecuencia la acumulación de biomasa, estado hídrico y carga de combustible (Viegas, 1997).

El índice meteorológico canadiense de incendios forestales o también conocido por sus siglas en inglés FWI (Fire Weather Index), es sin duda el método más empleado a nivel mundial en lo que a predicción de incendios forestales se refiere. Su estructura requiere la incorporación diaria de valores meteorológicos puntuales (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación), además de considerar la fecha del año.

En esta investigación se aplicará el índice canadiense de incendios forestales al departamento de Cusco, tomando en consideración la significancia existente entre el número de éstos eventos y los resultados obtenidos del índice para un periodo de prueba. Para lograrlo se empleará información meteorológica de superficie del re análisis atmosférico ERA-INTERIM, ya que su acceso es gratuito y cuenta con información meteorológica diaria desde 1979 al 2015.

Por lo tanto, con esta tesis se busca incorporar un sistema preventivo para la detección y reconocimiento de zonas meteorológicamente propensas al desarrollo y expansión de un incendio forestal; así como el periodo del año con mayor peligro. El FWI representado en mapas, ayudará a identificar los puntos de mayor frecuencia de incendios forestales dentro del territorio Cusqueño y servirá como un mecanismo de prevención además que con tablas estadísticas revelarán la época del año más significativa al desarrollo de los incendios forestales.

JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION

Los incendios forestales representan un peligro ambiental de alto riesgo, ya que diversos ecosistemas se verían comprometidos por el avance del fuego; siendo las consecuencias más representativas: interrupción de ciclos naturales de bosques acompañado de la desaparición de especies nativas, contribución al efecto invernadero y contaminación atmosférica generados por la quema de material vegetal y por último se compromete la calidad del suelo debido al aumento de PH y erosión.

El Perú no está ajeno a dicho problema, según los datos recolectados por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) para el periodo de 1995 al 2015, identifica al Cusco como el departamento peruano con mayor registro de incendios forestales dentro del país. En la tabla 1 se observa la distribución acumulativa anual de los incendios forestales para cada departamento en la misma relación de años; mientras que en el Figura 1 nos centralizamos en la distribución incendios registrados anualmente en Cusco; pudiéndose constatar que estos incendios son más recurrentes cada año. Tal desarrollo se explicaría principalmente por dos causales: alta vulnerabilidad de ignición de los ecosistemas forestales a partir de condiciones meteorológicas adversas (condición de sequía o baja tasa de precipitación) y prácticas de quema agrícola llevadas anualmente, las cuales al perder su control provocan los siniestros.

La estimación de área quemada en bosques nativos, bosques cultivados, matorrales, arbustos, pastizales y otra vegetación en tierras forestales y tierras de protección desde 1973 al 2014 (Manta, 2015) es de por lo menos unos 71 mil hectáreas en un total de 252 incendios registrados con base a las estadísticas de: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), Administración Técnica Forestal y de Fauna Silvestre (ATFFS), medios de comunicación, periódicos nacionales y locales, redes sociales y de estudios de maestrías.

Tabla 1: Registro del número de incendios forestales registrados cada año y por departamentos.

Año	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Amazonas				2	1	1					3				1	1	2	2			2	15
Ancash								1			4	1		1	2		2	4				15
Apurímac						1			3		7	6	1	11	7	13		5	8	15	8	85
Arequipa						2	1	1	1		1							3	3			12
Ayacucho											1			1	3	4	2	2	1	3	13	30
Cajamarca	1	1				10					1				4	11		7			2	37
Cusco	18	4	2	4	7	4	1	3	10	3	15	7	1	6	3	9	13	28	39	12	19	208
Huancavelica																2		1	1	1		5
Huanuco											2					1				1	1	5
Ica																						0
Junín													1			1		2	2			11
La Libertad	4																1					6
Lambayeque				4	3							1		4			1					13
Lima							1	1										2		2	2	8
Loreto				1		1					1		1					2			1	7
Madre de Dios					1						3	2						32		2		40
Moquegua									3	3	1								1	1		9
Pasco																2		1	3	11	17	
Piura	1	1		7	3	1			4		3			4			4	7	1		1	37
Puno	1	1				1			2		4			3	1	1		1	38	6	7	65
San Martín				2							2	1	2	2	1	7	1	8			2	28
Tacna																				1		1
Tumbes				1			1						1	14	1	1		3				24
Ucayali				1	1				3		12	3									4	24
Total	25	9	3	22	16	21	4	6	26	6	65	21	7	46	22	53	26	110	94	47	73	702

FUENTE: Elaboración modificada sobre los compendios estadísticos anuales del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) periodo 1995-2015.

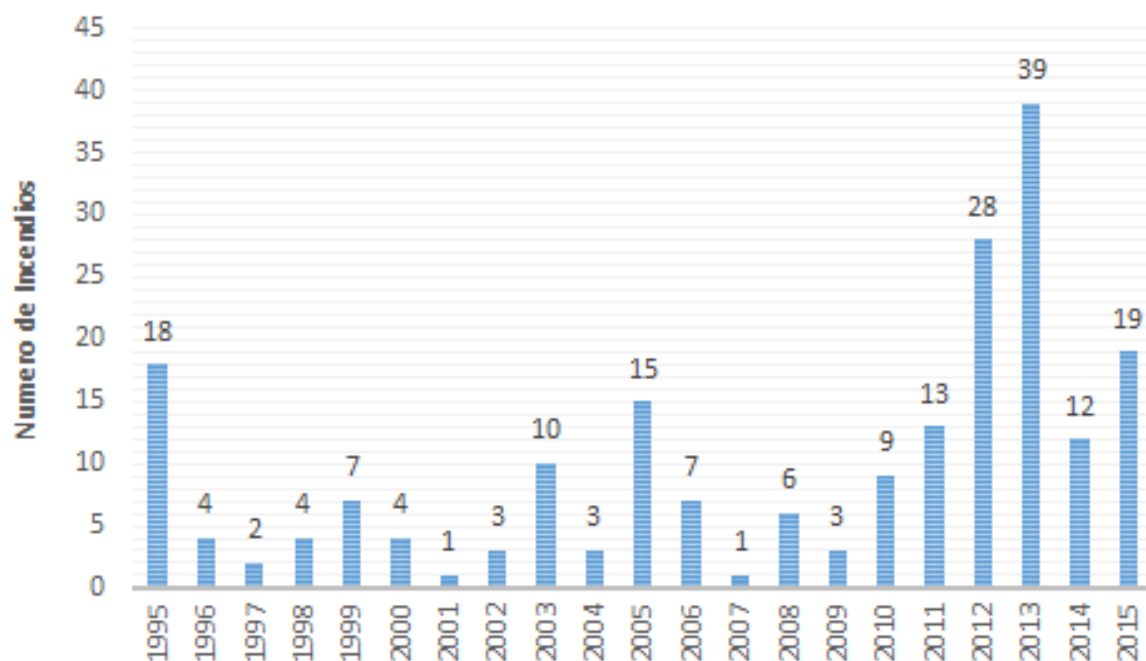


Figura 1: Registro anual de incendios forestales en el departamento de Cusco.
FUENTE: Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI).

Los análisis estadísticos de dichos registros evidencian dos elementos claves para la evaluación y estudio de incendios forestales. El primero (Figura 2) es poder reconocer la tasa de incendios forestales en cada una de las trece provincias del departamento Cusqueño. La convención lidera la tabla con 51 registros, seguido por Cusco y Urubamba, cada uno con 35 eventos registrados en los años de análisis. El segundo elemento de importancia es diferenciar los meses con mayor número de incidentes (Figura 3). La temporada de incendios comienza en Junio (el mes de mayo no se considera por presentar solo un registro en los 21 años de análisis) y termina en Noviembre teniendo su pico más alto en el mes de Agosto.

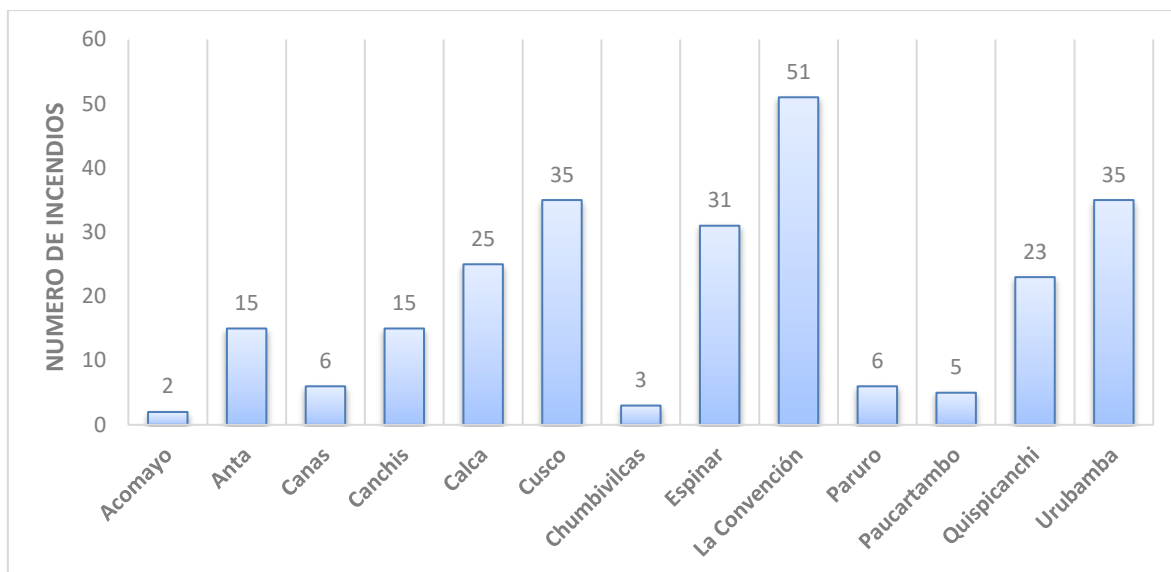


Figura 2: Número de incendios forestales por provincias Cusqueñas, periodo 1995-2014.
FUENTE: Elaboración propia sobre los datos de incendios forestales (Manta, 2015).

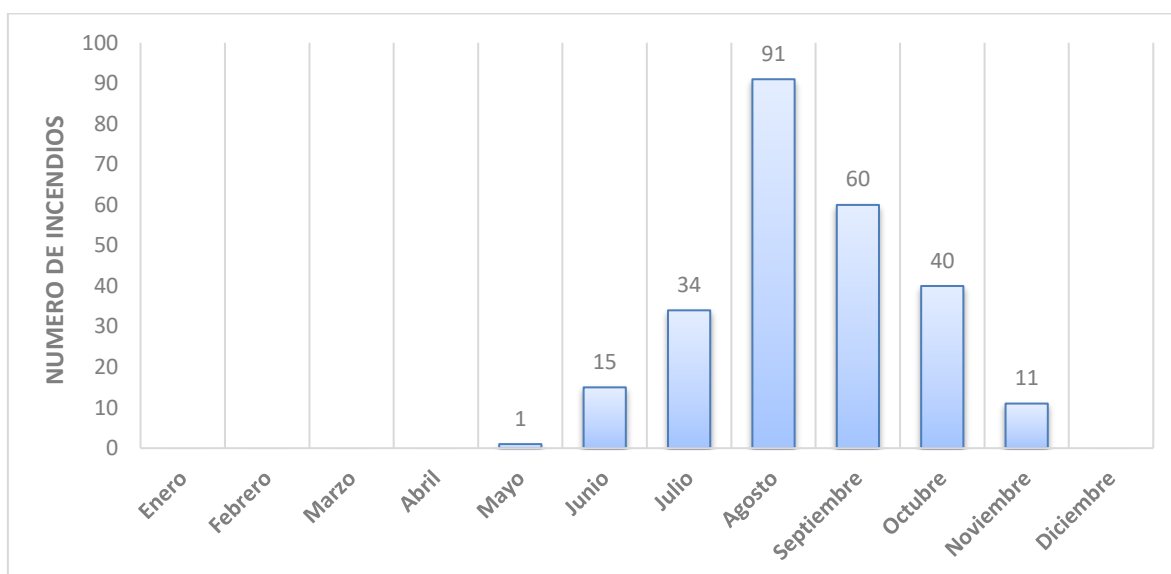


Figura 3: Número de incendios forestales por meses registrados, periodo 1995-2014.
FUENTE: Elaboración propia sobre los datos de incendios forestales (Manta, 2015).

Como es de esperarse, los incendios forestales no solo tienen impacto sobre el medio ambiente, sino que llegan a comprometer los intereses económicos de las personas. La mayoría de los incidentes son recogidos por la prensa local, la cual informa sobre la magnitud del siniestro. En algunos casos se pueden encontrar recortes periodísticos con historias de damnificados que han perdido o visto comprometido sus viviendas (Anexo 1), hectáreas de cultivo o cabezas de ganado (Anexos 2 - 3). También puede encontrarse informes narrando

la preocupación de las autoridades locales por la rápida expansión de las lenguas de fuego sobre áreas de patrimonio natural o cultural, como por ejemplo el santuario nacional de Macchu Picchu (Anexo 4). Otra temática registrada en los periódicos son casos leves de intoxicación y asfixia ocasionados por la quema de material vegetal (Anexo5).

Tomando estos resultados como referentes, se concluye que es necesario desarrollar estudios que mitiguen la alta tasa de incendios forestales en la región, ya que éstos dejan a su paso intensos daños sociales, ambientales y económicos que hasta el momento están débilmente evaluados en nuestro país. Frente a esta realidad es importante disponer de una caracterización del problema para iniciar acciones, programas de prevención, detección y control; así mismo se debe mencionar que en la actualidad no se ha incorporado ninguna escala de peligro para referenciar condiciones meteorológicamente propensas a desarrollar un incendio forestal.

El costo económico de incorporar el sistema de alerta temprana de incendios forestales aplicando el código “Fire Weather Index” es bajo. Para el caso de emplear como insumos los datos meteorológicos de modelos numéricos, dependiendo de la fuente, la información es gratuita mientras que la obtención de datos en superficie no implica gastos, sino más bien representan dificultades logísticas.

El índice meteorológico de incendios forestales puede emplear un registro diario, tomado a medio día, de las variables más representativas que se puedan encontrar en una estación meteorológica; la dificultad es desarrollar una logística de incorporación al código “FWI” de los datos observados en todas las estaciones meteorológicas disponibles en Cusco. Una vez superado los problemas de data meteorológica, el producto generado será una muestra de las condiciones de inicio u expansión de incendios forestales en un valor pico del día, alrededor de las 1600 HL (Hora Local), donde las condiciones de sequedad del combustible vegetal sean elevadas.

Al final, el resultado del índice será una medida cuantitativa que será asignada dentro de una escala cualitativa (Bajo, Moderado, Alto, Muy Alto y Extremo), de esta forma será más fácil hacer llegar el mensaje de alerta a las autoridades locales, bomberos, fuerzas armadas y en especialmente a los agricultores.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo principal

- Aplicar el índice meteorológico de incendios forestales canadiense “Fire Weather Index” para la región de Cusco empleando datos meteorológicos de re-análisis atmosférico ERA- Interim y los registros de incendios forestales disponibles dentro del periodo 1995 -2014.

Objetivos secundarios

- Determinar las zonas meteorológicas más propensas al inicio o desarrollo de incendios forestales en el departamento de Cusco empleando el Fire Weather Index como referente.
- Determinar los meses del año con mayor peligro meteorológico de incendios forestales en el departamento de Cusco, usando el código fuente modificado del Fire Weather Index.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El presente capítulo se dividirá en tres bloques, donde se presentará en secuencia los términos y elementos necesarios para comprender el comportamiento del fuego forestal seguido de la explicación del código “Fire Weather Index” (FWI), finalizando con una evaluación del área de estudio.

LOS INCENDIOS FORESTALES

La definición de incendio forestal cambia para cada país, pero convergen todos en un mismo criterio final. Se definirá como incendio forestal al fuego descontrolado que afecta a la vegetación (bosques nativos, plantaciones forestales y otra vegetación) que crece sobre las tierras forestales ya sea de producción o protección (F). También, es el fuego que afecta a la vegetación silvestre y a ambientes acuáticos emergentes, que se desarrollan en las tierras de protección (X), cualquiera sea su ubicación particular en el territorio nacional (Manta y León, 2004).

Los estudios referentes a incendios forestales se basan en la gran triada del comportamiento del fuego formada por: meteorología, topografía y combustible. Siendo los factores topográficos inmutables para un intervalo de tiempo corto, los factores meteorológicos no pueden ser alterados por el hombre a diferencia de los combustibles, es por ello que el estudio de las condiciones atmosféricas es necesario para prever situaciones críticas.

ELEMENTOS METEOROLÓGICOS AFINES A UN INCENDIO FORESTAL

El grado de combustibilidad de un vegetal fino muerto estará estrechamente afectado por la interacción de diferentes variables meteorológicas en el tiempo y espacio. Por ejemplo, se puede mencionar a la precipitación, humedad relativa y temperatura del aire como elementos que influyen directamente en la humedad del combustible vegetal; mientras que la evaluación del viento será útil para reconocer el grado de secado del material y potencial de propagación dentro de un incendio (Turner, 1961).

Es por esto que las condiciones meteorológicas van a caracterizar la compleja dinámica de los incendios forestales; en ciertos casos, estos elementos van a influir en la facilidad con la que los incendios puedan iniciarse y en otros, serán los responsables de la tasa de propagación.

ELEMENTOS DE INICIO DEL FUEGO

Poseen un efecto decisivo sobre la vegetación al regular el grado de desecación, así como la temperatura interna de los tejidos vegetales y en consecuencia los requerimientos de energía calórica externa necesaria para la ignición (Vélez, 2009).

2.2.1 PRECIPITACION

La precipitación se define como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes o del aire y se deposita en el suelo. Este fenómeno incluye: lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no incluye a la neblina, virga o rocío, ya que éstas son formas de condensación más no de precipitación (OMM, 2010).

El registro de lluvia se realiza mediante equipos de monitoreo meteorológicos totalizadores denominados pluviómetros, los cuales van a medir en milímetros de altura la cantidad de agua acumulada por el instrumento en un lapso de tiempo definido; esta medida será equivalente en volumen y área (expresado en litros por metro cuadrado).

La Organización Mundial de Meteorología recomienda leer las cantidades diarias de precipitación con una resolución de 0,2 mm; valores por debajo de éste no serán considerados como precipitación líquida y serán denominados trazas. Van Wagner y Pickett

(1985) en el desarrollo del índice canadiense de incendios forestales descubrieron que el valor crítico necesario para poder saturar la humedad contenida en los combustibles finos es de 0,5 milímetros. Este valor será, pues, el referente para definir a un día como seco o lluvioso.

Es entonces que se puede considerar a la precipitación líquida como la forma más fácil de cambiar el contenido de humedad del suelo y la vegetación. Influye inmediatamente sobre la humedad relativa de la atmosférica y de los combustibles vegetales muertos y, días después, en los combustibles vivos al incorporar a los tejidos de las plantas el agua del suelo (Vélez, 2000).

2.2.2 HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa es la relación porcentual entre la presión de vapor de agua en un volumen de aire con respecto a la presión de vapor que éste contendría si estuviese saturado.

Esta variable se ve directamente influenciada por las horas de sol y por la energía que se genere a lo largo del día (Gibos, 2001); encontrándose los máximos valores de humedad justo antes del amanecer y los mínimos al mediodía solar. Cuanto más caliente esté una masa de aire, mayor es la cantidad de vapor de agua que pueda retener; mientras que a bajas temperaturas almacena menos vapor de agua (SENAMHI, 2001).

Este parámetro meteorológico primario, está fuertemente asociado a la humedad de la vegetación; los combustibles forestales muertos son materiales higroscópicos (absorben humedad de la atmósfera). Cuando mayor sea el contenido de humedad de un combustible, se requerirá mayor energía calórica externa para eliminar el agua que contenga; por lo tanto, en un ambiente altamente saturado las probabilidades de ignición del combustible disminuyen a diferencia de su valor crítico de 30%, el cual por debajo desencadena condiciones muy favorables para el inicio y propagación del fuego (Manta, 2003).

2.2.3 TEMPERATURA DEL AIRE

La Organización Mundial de Meteorología (OMM) define a la temperatura como una magnitud física que caracteriza el movimiento aleatorio medio de las moléculas en un cuerpo físico. Es entonces, esta variable la que representa el constante flujo calórico de un cuerpo con otro o al medio que lo rodea.

El origen de la temperatura se dará a partir de la radiación solar, principal contribuyente de energía electromagnética que recibe nuestro planeta. Precizando que esta energía calentará las diferentes capas de la atmósfera. Siendo la misma diferenciable en latitud dentro de un espacio de tiempo evaluado, obteniendo como resultado estaciones de primavera, verano, otoño e invierno. La inclinación del eje de giro de la tierra respecto al plano de su órbita respecto al sol explica el diferencial. En la tropósfera baja existe una variación de temperatura inversamente proporcional con la altitud, a este cambio se le conoce como gradiente térmico. Esta es una disminución de $6,5^{\circ}\text{C}$ en promedio por cada kilómetro sobre el nivel del mar; sin embargo, se dan casos en donde el aire frío se coloca por debajo de una masa de aire caliente, a este fenómeno se le llama inversión térmica. El efecto provoca que el aire no pueda elevarse, puesto que está más frío, por ende, más denso en la parte inferior (COMET, 2014).

ELEMENTO DE PROPAGACIÓN DEL FUEGO

2.2.4 VIENTO

El viento de superficie se entiende como el movimiento del aire en relación a la superficie terrestre; para este caso se le considerará una unidad vectorial bidimensional, definida por la dirección y velocidad. Para una tercera dimensión se evalúa el recorrido vertical del aire, para tal caso existirá una función logarítmica que establezca la relación altura y rugosidad de superficie la cual será proporcional a la transferencia de movimiento cuantificada por la velocidad de fricción (Balocchi, 2010).

Su origen se debe a la diferencia de presiones entre una columna de aire caliente expandido verticalmente de otra en mismas condiciones, pero contraída por su naturaleza fría. En un incendio forestal de cierta magnitud, la atmósfera estará comprometida a los mismos principios definidos previamente. Al existir una masa de aire caliente en ascenso (columna de convección) con dinamismo provocado por el calor del incendio y las variaciones del perfil vertical de temperatura se genera un flujo de aire (Brotak y Reifsnnyder, 1977).

Es considerado por muchos expertos (Anon, 1978; Simard, 1971; Van Wagner, 1975) como el factor meteorológico más crítico en la propagación y comportamiento del fuego, raramente es regular y tiende en el tiempo a presentarse como un flujo turbulento, esto es, variaciones rápidas e irregulares en su velocidad y dirección.

Entre los efectos más destacables del viento en la propagación de los incendios son los siguientes:

- Retiro del aire cargado de humedad por acción del viento, aumentando la tasa de evapotranspiración ocasionando de esta forma una desecación del combustible forestal.
- Aporte de una mayor carga de comburente (oxígeno) a la combustión.
- El viento provoca la inclinación de la llama, lo que acelera la propagación del incendio precalentando los combustibles adyacentes.
- La dirección del viento será el rumbo que tome el incendio, por lo que un cambio brusco de la dirección cambiaría el desarrollo del mismo.

2.3 TOPOGRAFÍA

La configuración o relieve condiciona la generación de microclimas. Laderas de montaña expuestas a una radiación directa presentan mayor temperatura, menor cantidad de agua y por lo tanto menor cantidad de combustible que las de umbría. Las cadenas montañosas moldean las corrientes de viento. La pendiente es el factor más importante en el comportamiento del fuego siendo este parámetro de proporcionalidad directa con la propagación del incendio.

2.4 COMBUSTIBLE

La materia vegetal se compone básicamente de celulosa, con mayor o menor proporción de lignina, según la planta tenga consistencia leñosa o herbácea, y sustancias extractivas, resinas y aceites esenciales, principalmente.

El proceso de combustión de esta materia vegetal es inicialmente endotérmico, es decir, precisa de una fuente externa de calor. Cuando se aplica calor a las partículas de materia vegetal, comienza a ser absorbido a través de la superficie, si la temperatura de la fuente de calor es más alta que la de la partícula. Si es mayor la relación superficie a volumen de la partícula, más rápidamente será absorbido el calor y la temperatura de esta comenzará a subir.

En un incendio el foco calorífico que lo inicia suele ser puntual y efímero. Si no existiera combustible suficiente alrededor de ese punto que desprende calor para continuar el proceso de combustión iniciado, lo que se denomina “reacción en cadena”, el incendio se extinguirá por sí mismo. Por ello, para caracterizar la combustibilidad de una zona, según la definición de la misma, uno de los datos necesarios es la “cantidad de combustible” presente, determinada por el peso seco total (fitomasa) de combustible en una zona, mayor cantidad de calor podrá desprenderse y más intenso podrá ser el incendio.

2.5 ÍNDICES DE INCENDIOS FORESTALES

Los índices de peligro referente a los incendios forestales son escalas numéricas que buscan reflejar anticipadamente la posibilidad de inicio o propagación de un incendio; toma en consideración al combustible vegetal con las condiciones meteorológicas de su entorno (Merrill y Alexander, 1987).

A nivel mundial, algunos países han desarrollado sus propios métodos de estimación, pero con un costo de desarrollo elevado; ya que el proceso requiere de una gran cantidad de recursos y tiempo para la validación del modelo matemático. Es por ello que en otros países se ha optado por adoptar el uso total o parcial de un código conocido para una realidad específica.

Encontrando índices que evalúan la disponibilidad de agua o estado de humedad de los combustibles o los que permitan conocer las condiciones de estabilidad de la atmósfera. Entre los índices de incendios forestales más reconocidos tenemos al sistema canadiense (Fire Weather Index), Índice de sequía Keetch-Bryam, desarrollado en los Estados Unidos y el Sistema Métrico de Peligro de Incendios de Mc Arthur empleado para los bosques de eucalipto en Australia

2.6 ÍNDICE METEOROLÓGICO CANADIENSE

El índice describe el estado de la vegetación e inflamabilidad considerando la temporada del año, empleando como datos de entrada cuatro elementos del tiempo meteorológico registrados en superficie (Lluvia acumulada, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento) los cuales deben de ser tomados diariamente a mediodía u hora estándar local (1300 HL (Hora Local)). Considerado como un índice dinámico y acumulativo; compuesto por 6 componentes, divididos en tres códigos de humedad por tipo de combustible vegetal muerto, dos índices intermedios que representan la velocidad de propagación del fuego y la cantidad de combustible disponible y, por último, el FWI que representa la intensidad que tendría un incendio en base a un combustible estándar. El código se refiere principalmente a un tipo de combustible de pino estándar, pero es útil como una medida general de peligro de incendios forestales a nivel mundial (Van Wagner, 2000).

2.7 HISTORIA DEL “FIRE WEATHER INDEX”

Estudios, desde 1925, en el servicio forestal canadiense en relación a los incendios forestales han dejado en la actualidad el mejor modelo matemático que exprese, en formato de índice, la probabilidad de desarrollo de un incendio forestal (Wright, 1928). Durante décadas de investigaciones y prácticas llevadas en campo (cuatro versiones previas), se fue refinando el sistema de alerta meteorológico; aportes de Wright (1933) y Beall (1939) definirían las bases del código. Entre estos primeros avances se puede mencionar: simplificación de mediciones meteorológicas y de contenido de humedad de los combustibles forestales y por último, el aprendizaje del comportamiento del fuego forestal.

Para los años cincuenta y sesenta se llevó a cabo un mayor número de pruebas para la mejora del índice; se evaluó la correlación del combustible vegetal y los factores meteorológicos, además de analizar el comportamiento de los incendios en situaciones reales y experimentales. La evaluación del secado de combustible vegetal se determinó mediante pesadas sistemáticas. Calentado en una estufa y midiendo la humedad atmosférica se estimó el grado de desecación de los mismos. Esta práctica se desarrolló con diferentes tipos de combustibles, principalmente se consideró a los más próximos al suelo como hojas secas, ramillas caídas, matorrales, humus, turba, etc. Por último, se realizó una correlación entre la humedad atmosférica, la lluvia y el viento según la estación del año. Toda esta información fue sintetizada en formato de tablas, en donde se podría obtener el valor del índice general y en algunos casos el peligro que se da bajo condiciones específicas según el combustible o región (Anon, 1957).

Con el paso de los años se sumaron más investigadores que aportaron al enriquecimiento del código, los procedimientos de operaciones diarias los llevó a cabo Williams (1964), una forma básica del índice por Muraro en 1968 y las prácticas de campo utilizadas para calificar el peligro fueron descritos por Paul el año siguiente. Pero no es hasta en la década de los setenta, que con el avance de la tecnología se pudiese llevar todos los procesos de las investigaciones previas y organizarlos para el análisis por computador (Simard, 1970). La presentación del sistema al público en general se dió con el documento elaborado por Van Wagner en 1987, donde detalla minuciosamente las ecuaciones teóricas que rigen al índice y de las medidas necesarias para que este registre los valores representativos de los incidentes.

2.8 AREA DE ESTUDIO

2.8.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El departamento de Cusco está constituido por 13 provincias y 108 distritos. Está ubicado en la región sur oriental del Perú, con una extensión de 72 104 km² abarca zonas de sierra y selva. En la Figura 4 se muestra en forma de mapa la distribución geográfica y política de las provincias, además de mostrar los departamentos con que comparte frontera: Ucayali, Madre de Dios, Puno, Arequipa, Apurímac, Ayacucho y Junín.



Figura 4: División política de las 13 provincias del departamento de Cusco.

FUENTE: Elaboración propia con información geográfica del satélite Landsat.

2.8.2 CONDICION POBLACIONAL

Según los datos del último censo realizado en el 2007 por parte del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), la población del departamento de Cusco es de 1 171 403 habitantes. La mayor concentración poblacional se da en las provincias de Cusco (31,4%), La Convención (14,2%) y Canchis (8,27%). En la tabla 2 se pueden observar dicha distribución.

Tabla 2: Censo 2007 Población, Superficie, Densidad y Ubicación geográfica de las provincias de Cusco

Provincia	Población Total 2007	Superficie (km ²)	Densidad Poblacional (Hab/km ²)	Ubicación Geográfica		
				Altitud (msnm)	Latitud Sur	Longitud Oeste
Cusco	367 791	617	596,1	3 399	13°30'45"	71°58'33"
Acomayo	27 357	948,22	28,85	3 207	13°54'51"	71°40'52"
Anta	54 828	1 876,12	29,22	3 337	13°29'00"	72°09'12"
Calca	65 407	4 414,49	14,82	2 928	13°19'10"	71°57'21"
Canas	38 293	2 103,76	18,2	3 913	14°12'50"	71°25'50"
Canchis	96 937	3 999,27	24,24	3 554	14°16'10"	71°13'33"
Chumbivilcas	75 585	5 371,08	14,07	3 660	14°26'45"	72°04'50"
Espinar	62 698	5 311,09	11,81	3 915	14°47'16"	71°24'33"
La Convención	166 833	30 061,42	5,55	1 047	12°53'30"	72°44'00"
Paruro	30 939	1 984,42	15,59	3 051	13°45'19"	71°51'00"
Paucartambo	45 877	6 115,11	7,5	2 906	13°18'52"	71°35'36"
Quispicanchi	82 173	7 862,6	10,45	3 150	13°41'00"	71°37'27"
Urubamba	56 685	1 439,43	39,38	2 871	13°18'38"	72°07'02"
Total	1 171 403	72 104,01	16,25			

FUENTE: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

2.8.3 ESTRUCTURA ECONOMICA

Según información del INEI, en el 2015, Cusco aportó 4,8% al Valor Agregado Bruto (VAB) nacional, ocupando el tercer lugar a nivel departamental. También se registró un promedio de 8,5% en crecimiento referencial al periodo 2008-2015.

La principal actividad económica es la extracción de gas y minerales, con un 48,4% del VAB del departamento, seguido por el sector construcción (7,7%), comercio (7,4%), manufactura (4,9%), agricultura, ganadería, caza y silvicultura (4,7%), y las demás actividades económicas (26,9%).

Tabla 3: Valor agregado Bruto 2015 de las actividades económicas de Cusco

Actividad	VAB	Porcentaje
Agricultura, Ganadería, Caza y Silvicultura	984116	4,69
Pesca y Acuicultura	1319	0,01
Extracción de Petróleo, Gas y Minerales	10141320	48,37
Manufactura	1032231	4,92
Electricidad, Gas y Agua	182648	0,87
Construcción	1613463	7,70
Comercio	1560069	7,44
Transporte, Almacén, Correo y Mensajería	839158	4,00
Alojamiento y Restaurantes	830299	3,96
Telecom. Y otros Serv. Y Defensas	450510	2,15
Otros servicios	774946	3,70
Valor Agregado Bruto	2556199	100,00

FUENTE: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI)

La contribución de la actividad agropecuaria en el VAB departamental fue de 4,7 por ciento en el año 2015, siendo la quinta actividad más importante. La producción en este sector se caracteriza por usar tecnologías tradicionales y en los pocos casos en que incorpora avances tecnológicos, los rendimientos de algunos cultivos no logran alcanzar a las de otras zonas del país, situación reflejada en la poca rentabilidad de la actividad, por lo que grandes sectores de la economía campesina se caracterizan por su producción para el autoconsumo, siendo los principales cultivos: papa, café y maíz amiláceo.

2.9 CLIMATOLOGÍA

2.9.1 CIRCULACION ATMOSFERICA REGIONAL

Considerando la metodología empleada de reanalysis climatológico con el modelo NCAR-NCEP puede comprenderse los sistemas meteorológicos que modifican y rigen la climatología de América del sur (Quispe, 2005).

La circulación atmosférica sudamericana responde al balance energético experimentado por la variación estacional. Tal respuesta es evidenciable en la migración latitudinal de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual es una banda nubosa originada por la convergencia de los vientos alisios. La posición de la ZCIT sigue la estacionalidad solar, es decir que en el verano austral desciende y en el boreal sube. Para comprender totalmente esta dinámica atmosférica debe considerarse a la topografía de la cordillera de los andes como un factor físico con una distribución meridional la cual origina dos zonas climáticamente diferenciables; el lado occidental seco y el oriental pluvial.

Durante el invierno austral, en la tropósfera alta (200 hPa) se identifica un patrón de flujos de aire predominante del oeste y resalta la aparición de una corriente en chorro de tipo subtropical, caracterizada por valores de velocidad altos y humedad bajos, este sistema al desviarse al sur provoca convergencia en superficie y generará a lo largo subsidencia en su recorrido. Mientras que en una superficie baja (850 hPa) lo más representativo es el desplazamiento hacia el norte del sistema de alta presión del pacífico sur, provocando una intensificación de los vientos alisios y la seguida migración al norte del ZCIT. Como respuesta a esto se establecerá la temporada de estiaje en la cuenca amazónica y norte del Perú.

Mientras que el verano al contar con más energía disponible expresado en un mayor calor sensible y latente llega a establecerse como el periodo lluvioso y de máxima actividad convectiva, la ZCIT y el anticiclón del pacífico sur migran a latitudes más australes.

El comportamiento del viento en altura reconoce el desarrollo de una circulación anticiclónica sobre la meseta boliviana y una marcada vaguada a nivel del noreste brasileño; es de esperarse que se generen ocasionalmente vórtices ciclónicos de niveles altos que en su disipación desarrollen eventos severos como la ocurrencia de precipitaciones fuertes y

tormentas eléctricas en el trópico amazónico y la región ecuatorial sur (Ferreira et al., 2003). Mientras que en los niveles bajos se dan convergencias forzadas por la confluencia del viento, esto se da sobre la cuenca amazónica y al este de los andes, es este obstáculo geográfico el que moldea el recorrido de la corriente en chorro de Bajo nivel la cual inyecta humedad y calor incentivando convección de gran desarrollo en la región sur.

2.9.2 CLIMATOLOGÍA CUSQUEÑA

En base al análisis climático de los datos de 53 estaciones meteorológicas de superficie dentro de la cuenca del río Urubamba, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) ha podido establecer una distribución espacial de los valores anuales de precipitación y temperatura dentro de la región Cusco (Anexo 6).

La cuenca hidrográfica está ubicada entre los paralelos $10^{\circ}10'$ - $14^{\circ}37'$ latitud sur y entre los meridianos $70^{\circ}48'$ - $73^{\circ}45'$ de longitud oeste; con una superficie de aproximadamente $60\,000\text{ km}^2$ representa en un 60 % el área del departamento de Cusco, el 40 % restante está ubicada en la región alta de la cuenca y será considerada como representativa para la zona sur del departamento.

Se establecen dos franjas climáticas que dividen a la cuenca en dos regiones: la Parte Alta (al sur) entre los 2 500 y 3 730 msnm con temperaturas bajas y clima seco, mientras que en la parte conocida como Bajo Urubamba (al norte) entre los 300 y 1 000 msnm presentan temperaturas cálidas y lluviosas.

En la Figura 5 se presenta las precipitaciones mensuales promedio en la parte alta y baja de la cuenca del río Urubamba, observándose dos regímenes pluviométricos bien diferenciados. El periodo de lluvias, como en toda la región andina del Perú, se inicia en primavera e intensificándose en verano, para luego ralentizarse en otoño hasta disminuir notablemente en invierno definiéndose así el periodo seco.

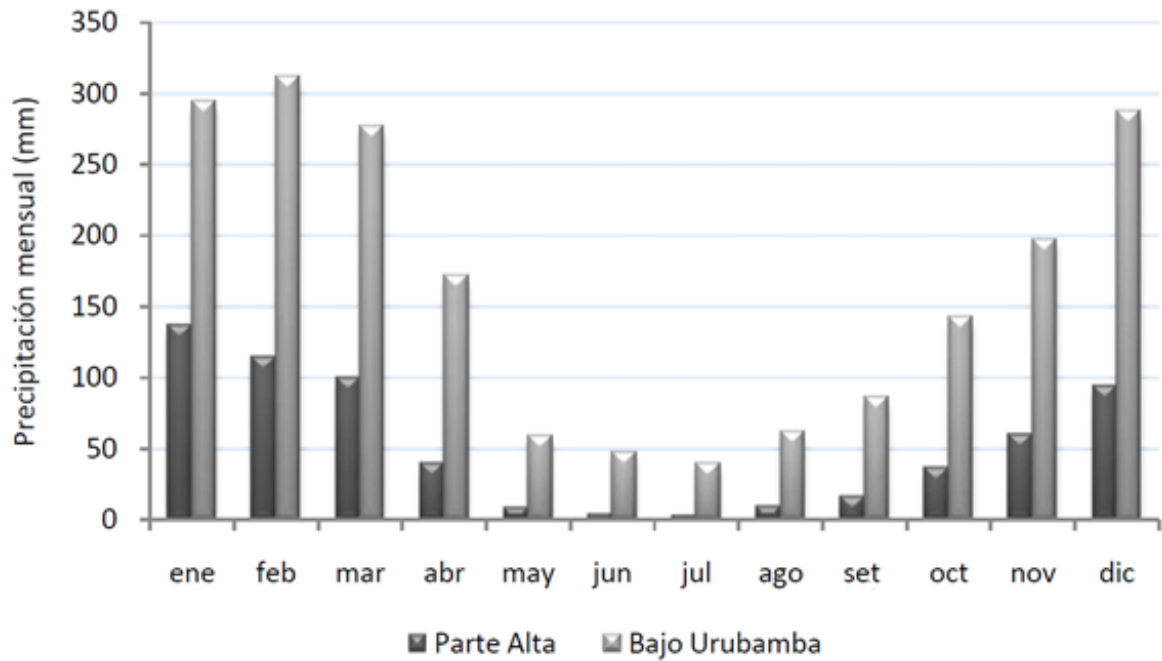


Figura 5: Registro mensual de precipitación diferenciada para la parte alta y baja de la cuenca del río Urubamba.

FUENTE: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

El relieve topográfico, gradiente de temperatura y condiciones sinópticas rigen las variaciones de temperaturas a nivel local en el transcurso del año y no la estacionalidad, es así que en la Figura 6 se puede identificar a las tierras bajas al norte de la cuenca con temperaturas mucho más cálidas que las ubicadas en el margen sur donde se registran los valores más fríos.

Durante el año, la temperatura máxima presenta dos máximos, uno en mayo y el más intenso en octubre, mientras que los valores mínimos se dan en verano, este comportamiento es el reflejo de la ausencia de nubosidad cerca del mediodía durante los meses de invierno, lo cual determina que dichas temperaturas sean mayores durante esta temporada que las correspondientes a las de verano. Respecto a la temperatura mínima los menores valores ocurren durante los meses de invierno, asociado a la menor presencia de nubosidad nocturna que favorece una mayor pérdida de energía. Durante los meses de primavera y verano, la presencia de nubes asociado a la temporada de lluvias aumenta, así como el contenido de humedad en la atmósfera.

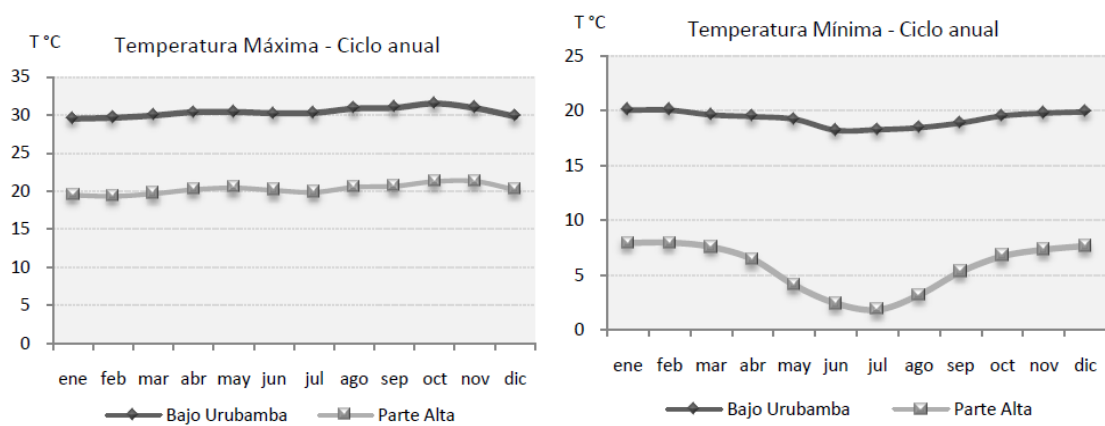


Figura 6: Ciclo anual de temperaturas máximas y mínimas para la parte alta y baja de la cueca del río Urubamba.

FUENTE: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ESTRUCTURA DEL “FIRE WEATHER INDEX”

El esquema general del índice resume el origen y el sentido que tomarán cada uno de los componentes del FWI para sus diferentes fases. En la primera etapa a partir de los datos meteorológicos observados en superficie, se desarrollaron los subíndices de saturación de hasta tres diferentes capas de suelo con diferentes velocidades de propagación y a distintas profundidades. Para la segunda parte se calculan los índices de dispersión e inicio del fuego a partir del viento y humedad de las capas de suelo. Finalmente, en la interacción de estos dos resultados que explican el comportamiento del fuego se podrá calcular el FWI.

OBSERVACIONES METEOROLOGICAS

Los elementos meteorológicos necesarios para hacer los cálculos son:

- Temperatura del aire (°C)
- Humedad Relativa (%)
- Velocidad del viento (km/h)
- Precipitación (mm)

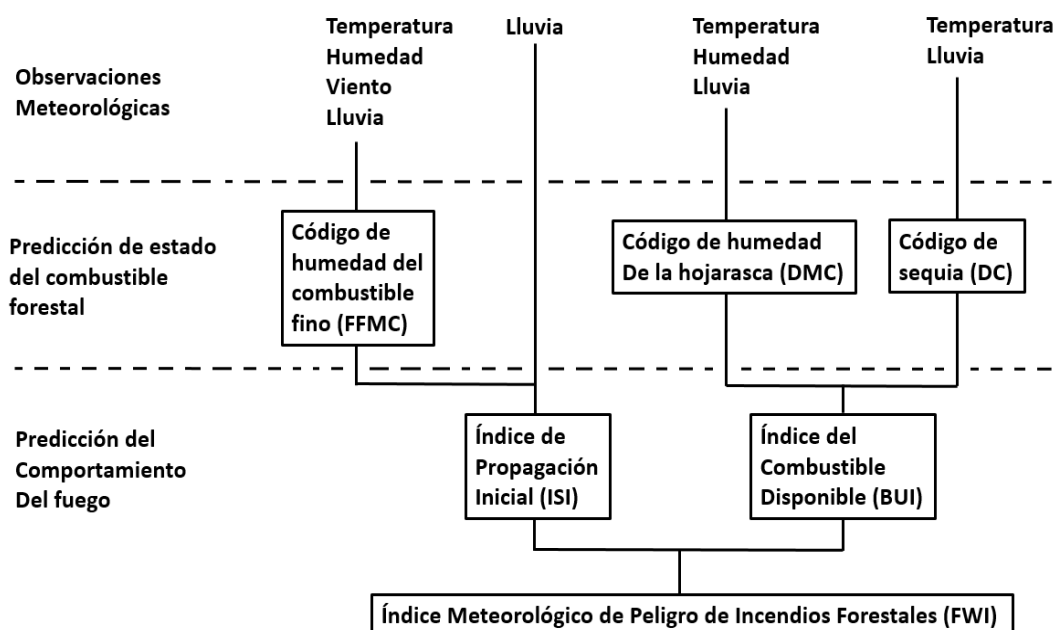


Figura 7: Estructura del índice Meteorológico de Incendios Forestales (FWI)
FUENTE: Elaboración propia a partir del esquema general propuesta por Van Wagner

3.2 CODIGOS DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE

Existen tres subíndices que explican el grado de humectación de los combustibles para cada capa específica: el contenido de humedad en los combustibles finos “Fine Fuel Moisture Code” (FFMC), el contenido de humedad de la hojarasca “Duff Moisture Code” (DMC) y el código de sequía “Drought Code” (DC).

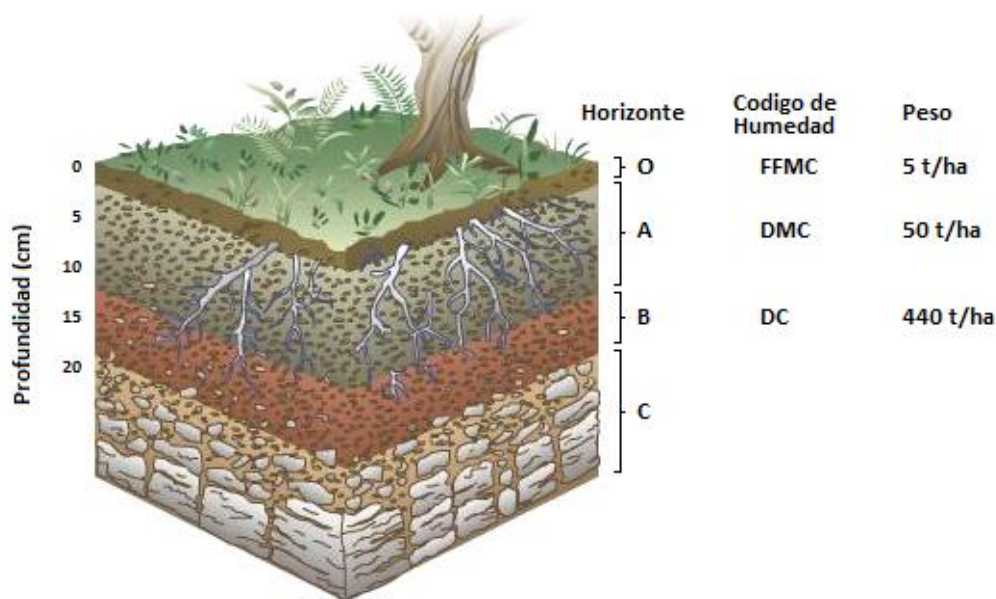


Figura 8: Representación gráfica de los horizontes del suelo y su relación con los códigos de humedad de combustible según su profundidad.

3.2.1 CODIGO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE FINO (FFMC)

Indica el contenido de humedad de combustibles finos (Acículas, musgos, ramas de menos de 1 cm de diámetro) dispuestos en la capa más superficial del suelo, con un margen de 1 a 2 centímetros de profundidad, y una disposición de 5 toneladas por hectárea (Groot, 1987). El código se ve afectado por la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y la lluvia siendo esta última el factor crítico, ya que el inicio de la humectación se da a partir de una precipitación acumulada en las últimas 24 horas de por lo menos 0,5 milímetros. Debido a que por lo general los incendios comienzan y se propagan en los combustibles finos, el FFMC es utilizado como indicador de probabilidad de encendido. Este índice tendrá una escala de composición cerrada, oscilando desde 0 al 99 donde su valor crítico de facilidad de ignición del combustible forestal es cercano a los 70.

Simbología en la ecuación

Tiempo

T	Temperatura del aire (°C)
H	Humedad Relativa (%)
W	Velocidad del viento (km/h)
r_o	Precipitación acumulada del día (mm)
r_f	Lluvia efectiva (mm)

FFMC

m_o	Contenido de humedad del combustible fino del día anterior
m_r	Contenido de humedad del combustible fino después de la lluvia
m	Contenido de humedad del combustible fino después del secado
E_a	Contenido de humedad en equilibrio después del secado
E_w	Contenido de humedad en equilibrio después del humedecimiento
K_d	Velocidad de secado
K_o	Valor intermedio de K _d
K_w	Velocidad de humedecimiento
K_l	Valor intermedio de K _w
F_o	FFMC del día anterior
F	FFMC del día

Desarrollo del código

1. Determinar F_o

El valor de inicio es 85, una vez que el código corra el valor de F_o se irá registrando.

2. Cálculo de m_o en base a F_o

$$m_o = 147,2 (101 - F_o) / (59,5 + F_o)$$

3. Cálculo de la precipitación efectiva

El cálculo de la lluvia efectiva presenta un valor crítico para el registro de la precipitación acumulada. Un valor mayor a 0,5 mm definirá:

$$r_f = r_o - 0,5 \quad r_o > 0,5$$

Mientras que para valores iguales o menores a 0,5 mm:

$$r_f = r_o = 0 \quad r_o \leq 0,5$$

4. Cálculo de m_r con datos de precipitación

Con el dato de lluvia efectiva, se aplica una correlación a la humedad del combustible fino, así mismo se considerará como valor crítico a 150.

$$m_r = m_o + 42,5 r_f (e^{-100/(251-m_o)})(1 - e^{-6,93/r_f}) \quad m_o \leq 150$$

$$m_r = m_o + 42,5 r_f (e^{-100/(251-m_o)})(1 - e^{-6,93/r_f}) + 0,0015 (m_o - 150)^2 r_f^2 \quad m_o > 150$$

$$m_r = 250$$

$$m_r > 250$$

Al final, el valor calculado de m_r se convertirá en el nuevo m_o .

5. Cálculo de E_d en función de temperatura y humedad

$$E_d = 0,942 H^{0,679} + 11e^{(H-100)/10} + 0,18(21,1 - T)(1 - e^{-0,115H})$$

6. Calculo de m considerando la velocidad de secado

Si $m_o > E_d$ entonces:

$$K_o = 0,424 [1 - (H/100)^{1,7}] + 0,0694 W^{0,5} [1 - (H/100)^8]$$

$$K_d = K_o 0,581 e^{0,0365 T}$$

$$m = E_d + (m_o - E_d) 10^{-K_d}$$

7. Calculo de m considerando la velocidad de humedecimiento

Si $m_o < E_d$ entonces:

$$E_w = 0,618 H^{0,753} + 10e^{(H-100)/10} + 0,18(21,1 - T)(1 - e^{-0,115H})$$

Si $m_o < E_w$ entonces:

$$K_l = 0,424 \left[1 - \left(\frac{100 - H}{100} \right)^{1,7} \right] + 0,0694 W^{0,5} \left[1 - \left(\frac{100 - H}{100} \right)^8 \right]$$

$$K_w = K_l 0,581 e^{0,0365 T}$$

$$m = E_w - (E_w - m_o) 10^{-K_w}$$

8. Condicional final del contenido de humedad del combustible fino

$$m = m_o \quad E_w \leq m_o \leq E_d$$

9. Calculo FFMC

$$F = 59,5(250 - m)/(147,2 + m)$$

3.2.2 CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MANTILLO (DMC)

También conocido como “Código de humedad en la hojarasca” es un indicador del contenido de humedad de las capas orgánicas débilmente compactadas cuya representación en carga combustible es de aproximadamente 50 t/ha, comprendidas a una profundidad moderada de entre 5 a 10 cm.

Esta capa de suelo se ve afectada por la lluvia, temperatura del aire y la humedad relativa. Debido a que estos combustibles están por debajo de la superficie, el viento no afecta el contenido de humedad de los mismos, provocando una velocidad de secado más lento que el de FFMC, además se debe considerar que existe un valor de precipitación crítico (1,5 mm) que logre generar efecto alguno en el DMC. A diferencia del FFMC, este nuevo código implica la necesidad de considerar dentro de sus cálculos de secado un valor estacional, la longitud del día vendría a ser este factor de corrección. Otra característica que se diferencia es la escala de composición abierta.

Simbología en la ecuación

Tiempo

T	Temperatura del aire (°C)
H	Humedad Relativa (%)
r_o	Precipitación acumulada del día (mm)
r_e	Lluvia efectiva (mm)

DMC

M_o	Contenido de humedad de la hojarasca del día anterior
M_r	Contenido de humedad de la hojarasca después de la lluvia
M	Contenido de humedad de la hojarasca después del secado
K	Velocidad de secado logarítmico
L_e	Longitud efectiva del día para DMC
b	Factor de pendiente
P_o	DMC del día anterior
P_r	DMC después de la lluvia
P	DMC del día

Desarrollo del código

1. Determinar P_o

El valor de inicio es 6 y una vez que el código corra el valor de P_o se ira registrando.

2. Cálculo de la precipitación efectiva

$$r_e = r_o \quad r_o \leq 1,5$$

$$r_e = 0,92r_o - 1,27 \quad r_o > 1,5$$

3. Cálculo de M_o en función de P_o

$$M_o = 20 + e^{(5,6346 - P_o/43,43)}$$

4. Cálculo de la pendiente DMC para 3 diferentes condiciones

$$b = 100/(0,5 + 0,3 P_o) \quad P_o \leq 33$$

$$b = 14 - 1,3 \ln P_o \quad 33 < P_o \leq 65$$

$$b = 6,2 \ln P_o - 17,2 \quad P_o > 65$$

5. Cálculo del contenido de humedad de la hojarasca después de la lluvia

$$M_r = M_o + 1000 r_e / (48,77 + b r_e)$$

6. Cálculo de P_r

$$P_r = 244,72 - 43,43 \ln(M_r - 20)$$

$$P_r = 0 \quad \text{Si } P_r < 0$$

7. Grabación del DMC previo y diario

$$P_r = P_o$$

8. Valor en tablas de la Longitud efectiva del día para DMC (L_e)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
L_e	6,5	7,5	9,0	12,8	13,9	13,9	12,4	10,9	9,4	8,0	7,0	6,0

9. Calculo de la velocidad de secado logarítmico

$$K = 1,894(T + 1,1)(100 - H) L_e 10^{-6}$$

$$\text{Si } T < -1,1 \text{ entonces, } T = 1,1$$

10. Calculo de DMC

$$P = P_o(\text{or } P_r) + 100K$$

3.2.3 CODIGO DE SEQUIA (DC)

Indicador de humedad de capas orgánicas profundas y compactas de muy lento proceso de secado. Este código representa a la capa combustible localizada a rededor de 10 a 20 cm de profundidad con una carga estimable de 400 t/ha.

Las principales variables meteorológicas que influyen en el grado de saturación son temperatura y precipitación, esta última debe registrar por lo menos un valor de 2,8 mm de lluvia acumulada en las últimas 24 horas para ser tomadas en cuenta en el código.

La tasa de secado es el más lento de los 3 tipos de combustible por lo que, al igual que el DMC presentará un factor de corrección estacional. También es de código abierto, siendo su valor máximo probable 800.

Simbología en la ecuación

Tiempo

- T** Temperatura del aire (°C)
r_o Precipitación acumulada del día (mm)
r_a Lluvia efectiva (mm)

DMC

- Q** Humedad equivalente DC, múltiplo de 0,254 mm
Q_o Humedad equivalente DC del día anterior
Q_r Humedad equivalente después de la lluvia
r_a Lluvia real
V Evapotranspiración, múltiplo de 0,254 mm/día
L_f Longitud efectiva del día para DC
D_o DC del día anterior
D_r DC después de la lluvia
D DC del día

Desarrollo del código

1. Determinar D_o

El valor de inicio es 15 y una vez que el código corra el valor de D_o se ira registrando.

2. Cálculo de la precipitación efectiva

$$r_d = 0,83r_o - 1,27 \quad r > 2,8$$

$$r_d = r_o \quad r \leq 2,8$$

3. Calculo de Q_o

$$Q_o = 800 e^{D_o/400}$$

4. Calculo de Q_r

$$Q_r = Q_o + 3,937r_d$$

5. Calculo de D_r

$$D_r = 400 \ln(800/Q_r)$$

Si el valor de D_r es negativo, entonces: $D_r = 0$

6. Valor en tablas de la Longitud del día para DC (L_f)

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
L_f	-1,6	-1,6	-1,6	0,9	3,8	5,8	6,4	5,0	2,4	0,4	-1,6	-1,6

7. Calculo de la evapotranspiración potencial

$$V = 0,36(T + 2,8) + L_f \quad V > 0$$

Si $T \leq -2,8$ entonces, $T = 2,8$

$$V = 0 \quad V < 0$$

8. Calculo del DC

$$D = D_o(\text{or } D_r) + 0,5V$$

3.3 ÍNDICE DE FUEGO

3.3.1 ÍNDICE DE PROPAGACION INICIAL (ISI)

Este índice indica una estimación de la tasa de propagación de la velocidad del fuego, considerando los datos de velocidad del viento y los resultados del FFMC.

Simbología en la ecuación

Tiempo

W Velocidad del viento (km/h)

ISI

f(w) Factor del viento

f(F) Factor de la humedad del combustible fino

m Contenido de humedad del combustible fino después del secado

R ISI del día

Desarrollo del código

1. Determinar factor viento

$$f(w) = e^{0,05039W}$$

2. Determinar la humedad del combustible fino

$$f(F) = 91,9e^{-0,1386m} [1 + m^{5,31} / (4,93 \times 10^7)]$$

3. Cálculo del índice de propagación inicial

$$R = 0,208 f(W)f(F)$$

3.3.2 ÍNDICE DE COMBUSTIBLE DISPONIBLE (BUI)

Es una combinación ponderada del DMC y DC para indicar la cantidad total de combustible disponible para la combustión y propagación de incendios.

Simbología en la ecuación

BUI

U Índice de combustibles

P DMC

D DC

Desarrollo del código

1. Cálculo del índice combustible disponible condicionado

$$U = 0,8 PD / (P + 0,4D) \quad P \leq 0,4D$$

$$U = P - [1 - 0,8D / (P + 0,4D)][0,92 + (0,0114P)^{1,7}] \quad P > 0,4D$$

3.3.3 ÍNDICE METEOROLOGICO DE INCENDIOS FORESTALES (FWI)

El “FWI” al combinar los índices de velocidad de propagación de inicial (ISI) y el índice de combustible disponible (BUI) se obtiene un indicador de la intensidad de propagación del fuego.

Simbología en la ecuación

FWI

f(D) Factor de humedad de la hojarasca

U Índice de combustibles

B Valor intermedio del FWI

S Valor final del FWI

Desarrollo del código

1. Cálculo del factor de humedad

$$f(D) = U^{0,809} + 2 \quad U \leq 80$$

$$f(D) = 1000 / (25 + 108,64 e^{-0,023U}) \quad U > 80$$

2. Calculo del “FWI”

$$B = 0,1 R f(D)$$

$$\ln S = 2,72(0,434 \ln B)^{0,647} \quad B > 1$$

$$S = B \quad B \leq 1$$

3.4 HABILITACION DEL CODIGO FUENTE

El índice canadiense de incendios forestales (FWI) basa su estructura en una compleja secuencia de ecuaciones que se interaccionan unas con otras y están bajo condicionales de entrada que restringen las salidas para nuevos parámetros. Asimismo, es necesario mencionar que el código original fue diseñado para condiciones de combustibles forestales y de tiempo atmosférico en Canadá. Sin embargo, el autor (Van Wagner, 1987) menciona la posibilidad de trabajar bajo cualquier latitud considerando las tablas de corrección para longitud efectiva del contenido de humedad del mantillo (L_e) y la longitud del día para el código de sequía (L_f). Bajo estas recomendaciones y en base a un precedente de éxito incorporado el sistema FWI a una zona tropical, sudeste asiático (Groot, 2004), es que se procede a desarrollar el código adaptado al departamento de Cusco.

Para el desarrollo del código fuente se recurrió al lenguaje de programación FORTRAN 90, teniendo como plataforma de trabajo el compilador GFortran en el sistema operativo libre de Linux-Ubuntu, la elaboración y corrida del código fue ejecutado en un ordenador ASUS X55UB procesador Intel Core i5-62000 2.4GHz.

El código de lectura será para 365 datos, los cuales representan los días de un año no bisiesto, caso contrario se aumentará la data a 366. “Real, parameter” define valores constantes en los cálculos, para la longitud efectiva del contenido de humedad del mantillo se le asigna $L_e = 9,0$ y para la longitud del día para el código de sequía $L_f = 1,4$.

El código comienza declarando las variables con las que se van a trabajar. Se apertura el archivo “datos_meteorologicos”, el cual contiene información meteorológica de 4 variables básicas del tiempo atmosférico (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y lluvia), éstas deberán estar distribuidas en 4 columnas de manera diaria en un archivo de texto separado.

El comando “open” extrae los 365 datos meteorológicos (365 días del año) y los incorpora al código, donde será necesario establecer un inicio y fin del proceso ya que el código sequia (DC), hídricamente más sensible, recibe su máxima capacidad de retención por lluvia en la temporada de máxima precipitación, determinando de este modo el inicio y a la vez el fin de la evaluación. Por ello se recurre a analizar el patrón de precipitación del área de estudio (Figura 5) normalmente hay suficiente precipitación durante el invierno para saturar los combustibles forestales y por lo tanto los códigos de humedad del índice puede considerarse cero. El criterio a desarrollar será considerar como punto de partida al 1 de Enero y fin el 31 de Diciembre.

Para comenzar los cálculos de los primeros tres códigos de humedad será necesario establecer los valores de partida, los cuales según bibliografía son: FFMC 85; DMC 6; DC 15. Así mismo es preciso indicar que a los tres días de marcha del código se homogenizan los datos y se obtienen resultados representativos.

El código de humedad del combustible fino solo reconoce valores de precipitación por encima de los 0,5 mm de lluvia, a ésta la llamaremos precipitación efectiva, ya que la magnitud de precipitado ingresará a trabajarse dentro del código, por otro lado, los valores por debajo son considerados como trazas y se les asigna la numeración de cero, la cual indica un día sin precipitación.

De esta forma, si es que hay precipitación efectiva se procederá a calcular el contenido de humedad en el combustible fino después de la lluvia, donde se elige el modelo de cuantificación según el valor crítico (150) y considerando el valor máximo posible registrable por el material combustible (250).

Se calcula el valor de humedad en equilibrio después del secado (E_d) con el objetivo de determinar ecuaciones posteriores, se compara este valor con el FFMFC del día anterior y se establece un criterio de continuación. Se suman las demás variables meteorológicas a los cálculos y al final, para cada prueba se obtendrá un valor de contenido de humedad del combustible fino ya seco, el cual ingresa a una única ecuación de cálculo del “FFMFC” diario.

El contenido de humedad del mantillo parte desde su valor inicial 6 y se diferencia de la anterior capa porque ésta considera 1,5 mm como lluvia efectiva. Cuantifica el contenido de humedad de la hojarasca del día anterior y bajo un criterio de decisión del valor encontrado, se le asigna una de las tres ecuaciones empíricas diferenciados para los rangos de P_o . Los cálculos posteriores definen consideraciones de temperatura, régimen de lluvia y P_o del día anterior para poder concretar un valor final de DMC, así mismo este código acepta un valor constante ($L_e=9$) por desarrollarse en una latitud tropical, cada mes este coeficiente corrige los valores de salida.

El último código de humedad es el de sequía y se establece en una capa profunda de material orgánico altamente compactado. Considera 15 como valor de partida del DC. Reconoce como lluvia efectiva un valor más elevado que los anteriores (2,8 mm) y según este umbral se procede a diferenciar el cálculo para fases de lluvia o sequía. En la fase seca se representa a la evapotranspiración potencial (V) que viene dada bajo una ecuación empírica dependiente de la temperatura y temporada del año, por lo que el factor de corrección para una latitud tropical se establece constante para todos los meses ($L_f=1,4$). La humedad equivalente está definida bajo una ecuación de relación logarítmica que define 800 unidades de longitud que es equivalente a 8 pulgadas de agua que reconoce el código.

El último tramo es reconocer los subíndices relacionados con el fuego, siendo estos: el índice de propagación inicial “Initial Spread Index” (ISI) y el índice de combustible disponible “Build-up Index” (BUI). El cálculo del ISI recoge información del viento y el valor del código de humedad del combustible fino, mientras que el valor de BUI junta los dos códigos de humedad restantes (código de humedad del mantillo y código de sequía). Al finalizar se relacionan los dos índices intermedios para generar el valor final del código, obteniéndose de esta forma el índice de incendios forestales (Fire Weather Index “FWI”).

De este valor también se desprende un valor adicional “DSR”, el cual es un indicador de la dificultad de extinción de un incendio a partir del valor directo obtenido del FWI. El código culmina con la creación de un archivo de texto denominado “Resultados.txt”, el cual distribuye cada una de las variables calculadas por columna, de tal forma que al final se cuente con 365 datos (o 366 datos si fuese bisiesto) por variable y 6 columnas.

3.5 VERIFICACION DEL CODIGO

Al terminar la compilación del programa fuente será necesario verificar los valores de salida obtenidos en bases a una bibliografía referente. Para tal práctica se comparó los resultados generados a partir de los datos de “Equation and Fortran Program for the Canadian Forest Fire Weather Index System” (Anexo 7), donde se podrá establecerse si el código diseñado cumple correctamente con lo propuesto por Van Wagner en 1985.

3.6 DATA METEOROLOGICA

Para desarrollar correctamente una climatología de fuego para el departamento de Cusco, será necesario contar con información meteorológica consistente, así como de contar con un gran número de estaciones meteorológicas estratégicamente distribuidas en superficie. Éstas debieron haber registrado ininterrumpidamente variables de tiempo atmosférico básicas (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación líquida) para un periodo no menor a los 10 años. Debido a la dificultad de acceso y logística que implica contar con una red de información real continua, se decidió por emplear información meteorológica por cuadrantes extraída del re-análisis atmosférico Era-Interim (Figura 9) desarrollado y avalado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (CEPMPM, o ECMWF por sus siglas en inglés European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

La calidad del modelo está ligada a lo bien que aprovechan la información recibida en tiempo real del sistema mundial de observación, el cual se compone de numerosos instrumentos, satélites, estaciones meteorológicas, barcos, boyas y otros componentes.

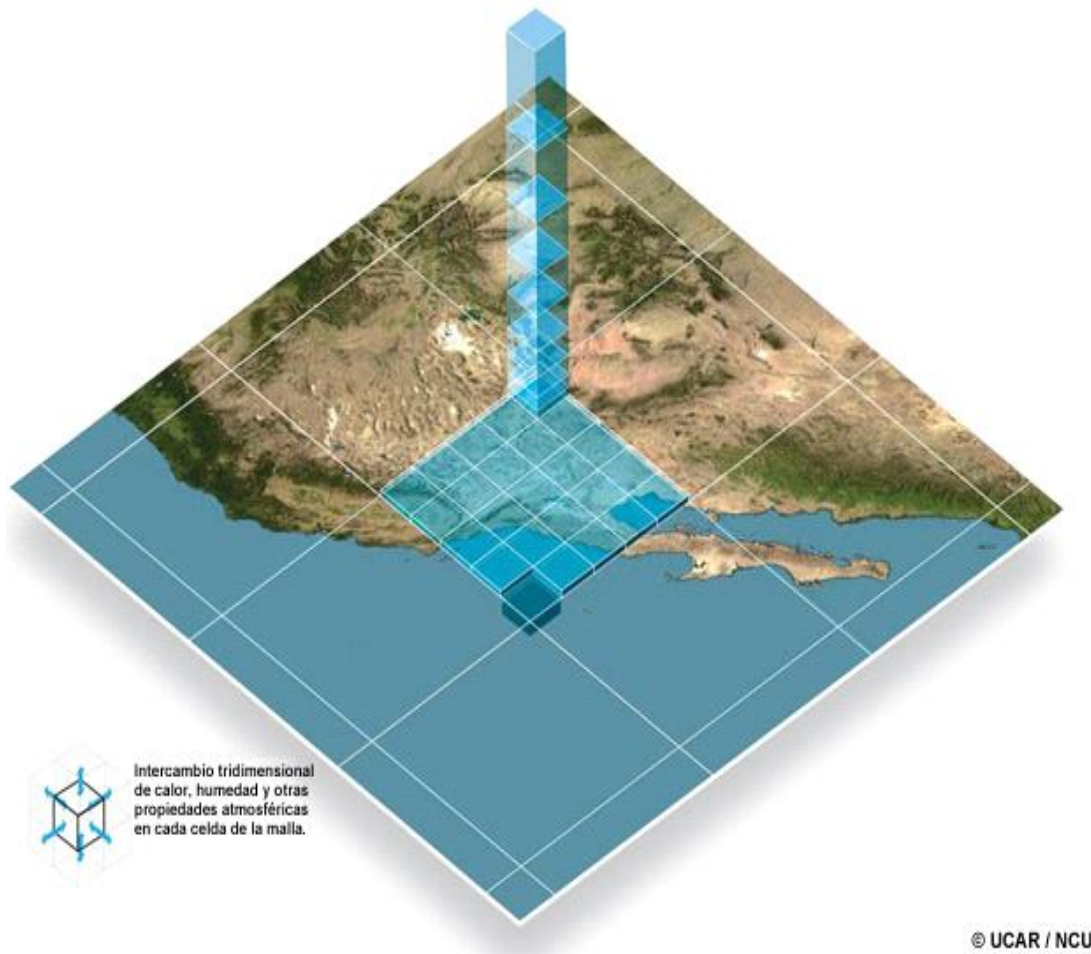


Figura 9: Ejemplo de cuadrícula para un modelo climático.

FUENTE: Programa COMET con respaldo de UCAR/NCU.

Esta asimilación de datos es típicamente un procedimiento secuencial en el que un pronóstico del modelo anterior se compara con las observaciones recibidas recientemente, el modelo de estado se actualiza para reflejar las observaciones, se inicia un nuevo pronóstico, y así sucesivamente. El paso de la actualización en este proceso se conoce como el análisis y si se contrasta con modelos numéricos de predicción, dentro de una serie meteorológica extensa (climatología) a este proceso se lo conoce como reanalysis.

Tabla 4: Recuadro descriptor de las principales características del Era-Interim

	ERA ITERIM
Fuente	ECMWF
Cobertura temporal	4-veces al día, todos los días desde 1979 - 2015
Cobertura espacial	0.75 grados de latitud x 0.75 grados de longitud
Niveles	37 Niveles de presión, 1 a 1000 hPa, cuasi-logarítmica 15 Isotrópicas (theta), 265 a 850 grados Kelvin. 1 Valor de superficie global
Variables	14 variables de nivel de presión 48 variables de análisis superficiales 84 variables de pronóstico en superficie 4 variables a nivel theta

FUENTE: Elaboración propia en base al ECMWF

Antes de realizar la descarga de información meteorológica, previamente será necesario registrarse como usuario del servidor. El acceso a los datos es de manera virtual desde su página web: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>. Para comenzar, primero se debe realizar las configuraciones del pedido, se seleccionan las opción “Surface” en la clase “Type of Level” y “Daily” en la clase “ERA Interim Fields” respectivamente, las cuales están ubicadas al margen izquierdo de la página. Posteriormente se marcan los años de estudio de la prueba, cada año consta de 12 meses y a su vez contienen datos diarios; es decir que si selecciona por ejemplo el mes de Enero se estaría reconociendo 31 datos.

Los datos diarios pueden contener hasta 4 registros según el Tiempo Universal Coordinado (UTC), estos se dan a las: 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00. Los datos del modelo “Fire Weather Index” requieren información meteorológica a medio día para el cálculo de sus ecuaciones, considerando que el Perú está desfasado 5 horas negativamente en relación al uso horario, se recomienda seleccionar la opción “18:00” para estar trabajando con data representativa al mediodía local.

La opción “Select Step” hace referencia a las horas de pronóstico (+0, +3, +6 y +12 horas) a las que se somete la hora establecida previamente, es decir que si en la opción “Select

Time” se eligió trabajar a las 12 UTC y se seleccionó +6 horas, entonces se tendría el pronóstico del tiempo de las 18 UTC. La opción “Select Parameter” es elección de las variables meteorológicas disponibles para ser descargadas, para esta investigación se procederá a descargar a las 18:00 UTC y con +0 horas de pronóstico las variables: “2 metre dewpoint temperatura” (Temperatura de rocío a 2 metros de la superficie), “2 metre temperatura” (Temperatura del aire a 2 metros de la superficie)”, “10 metre U wind component” (Componente U del viento tomado a 10 metros de la superficie), “10 metre V wind component” (Componente V del viento tomado a 10 metros de la superficie).

Para el cálculo de humedad relativa, será derivada de los cálculos de temperatura de rocío y temperatura ambiente, mientras que el viento se dará a partir de la integración de las componentes del viento (U, V). El valor de precipitación requiere un proceso de descarga diferente, en donde se diferencia por la hora de inicio y pronóstico. Debido a que esta variable debe estimarse de manera acumulativa las últimas 24 horas, se evaluó la mejor forma representativa de obtener esta información a partir de las opciones de Era-Interim disponible por lo que se optó por seleccionar como inicio las 00:00 UTC con pronóstico de +12 horas, considerando la existencia del desfase negativo de 5 horas en Perú, cada muestra barre información de las 7:00 p.m. del día anterior y culmina a las 7:00 a.m. del día de la prueba. Es decir que se trabajará con un valor acumulativo de precipitación de solo 12 horas, los resultados encontrados en el punto 4.3.3 explican la representatividad de emplear la variable “Convective precipitation” (Precipitación convectiva) para este periodo de prueba.

Ya que la variable precipitación presenta un periodo de muestreo diferente a las demás variables, se tendrá que descargar dos archivos de trabajo; el primero denominado “ECMWF.nc” conteniendo información de 4 variables (2 metre dewpoint temperatura, 2 metre temperatura, 10 metre U wind component, 10 metre V wind component) con un total de almacenamiento de 11,6 GB. El segundo archivo lo denominaremos “P-0F12.nc” y contiene información de precipitación “Convective precipitation” (Precipitación convectiva) con 2,9 G.B de almacenamiento; ambos archivos tienen la terminación “.nc” la cual indica que son de tipo NetCDF (Figura 10).

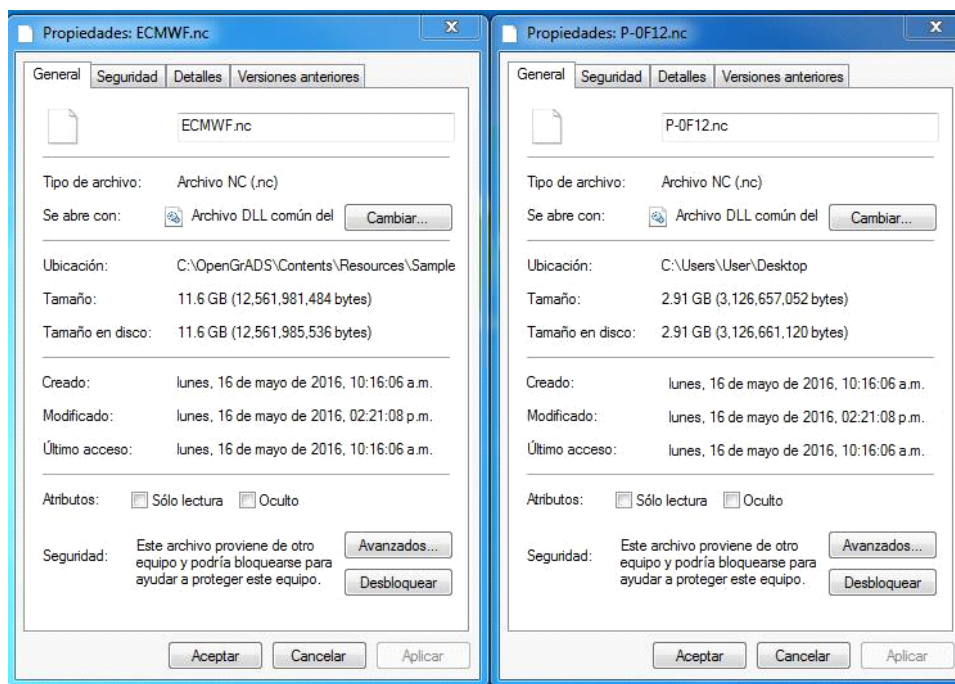


Figura 10: Propiedades de los archivos descargados

3.7 GEOREFERENCIACION Y EXTRACCION DE DATOS METEOROLOGICOS

Los archivos “ECMWF” y “P-0F12” contienen información meteorológica del Era-Interim en superficie para una temporalidad diaria desde 1979 al 2015 con resolución espacial, por cuadrantes, de 0,75° a nivel mundial.

Sin embargo, esta información no es visible directamente, requiere de un procesamiento de datos. Para tal proceso se diseñaron un conjunto de archivos con órdenes (Script) para ser trabajados en “Grid Analysis and Display System” (GrADS); la cual es una herramienta informática con interfaz programable que facilita el acceso, análisis, manipulación y visualización de datos de la tierra.

La delimitación del área de trabajo consistió en reconocer geográficamente al departamento de Cusco y sus 13 provincias; para ello se utilizó archivos “shapefile”; éste es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos.

El archivo consta de las siguientes extensiones:

.shp - Almacena las entidades geométricas de los objetos.

.shx - Almacena el índice de las entidades geométricas.

.dbf - Almacena la información de los atributos de los objetos.

.prj - Guarda la información referida al sistema de coordenadas en formato WKT.

.sbn y .sbx - Almacena el índice espacial de las entidades.

Actualmente esta información geográfica referente al Perú se encuentra de manera gratuita en el geo-servidor del el Ministerio del Ambiente (MINAM).

El proceso de reconocimiento geográfico del área de estudio requiere que previamente se realice una edición, ya que el mapa grafica a todas las provincias del Perú y no solamente a las provincias Cusqueñas, como se esperaba trabajar. Se recurre a una eliminación simple de las demás provincias mediante el software ArcGis en su versión libre. Se monta la capa “provincias.shp” (Archivo del geoservidor del MINAM) y con la opción “Editor” seleccionamos las demás provincias del Perú que no estén dentro de Cusco, paso siguiente se eliminan y se guarda el archivo con el nombre “provincias_Cusco”.

En Figura 11 se muestra el mapa del Perú con sus 184 provincias en la parte izquierda y a su lado derecho el proceso final de la delimitación a tan solo 13 provincias Cusqueñas.

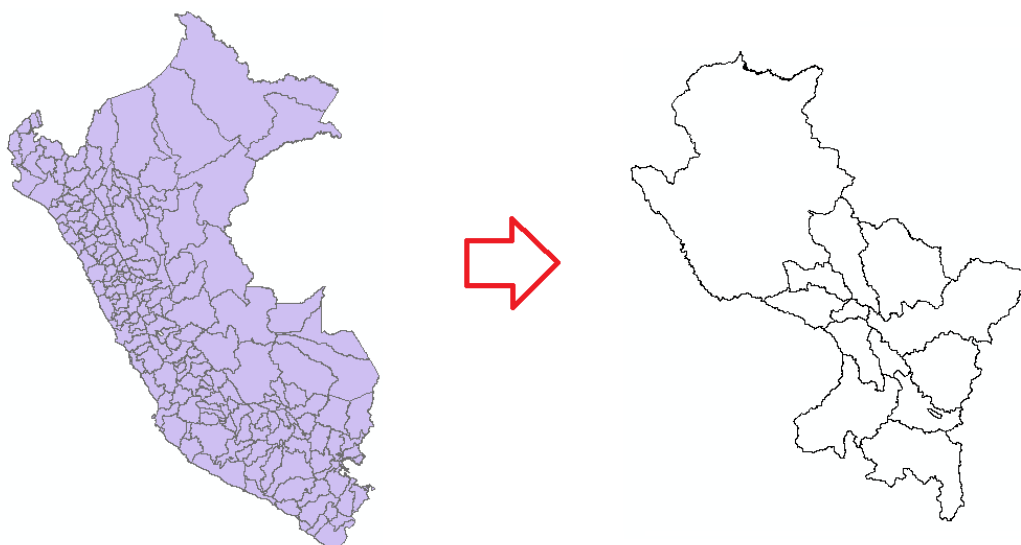


Figura 11: Edición de datos geográficos, selección de solo las provincias de Cusco.

Para definir el área de trabajo y reconocer los cuadrantes del modelo a usar, se empleó el software OpenGrads en un entorno Windows (fuente de descarga: <http://opengrads.org/>); ya que en esta plataforma se tiene un mayor grado de control y edición en librerías y carpetas que una distribución Linux. Los archivos meteorológicos descargados del servidor ECMWF y los límites provinciales de Cusco van a estar ubicados dentro de la carpeta “SampleDatasets” (Figura 12). Dentro de la misma se creara un “script” para automatizar el proceso reconocimiento geográfico, se lo nombrará como: “Limites_Cusco.gs”

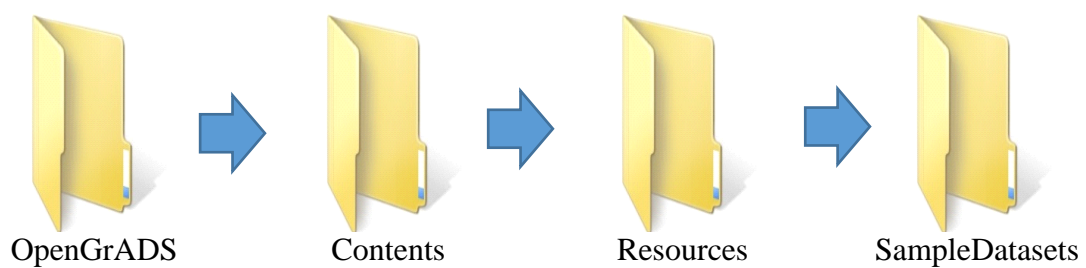


Figura 12: Ruta de trabajo principal en OpenGrads.

Los datos recogidos del modelo Era-Interim abarcan un periodo temporal de 37 años (1979-2015) y están cifrados en código binario de formato NetCDF, por lo que no pueden visualizarse los valores de las variables de manera directa; por ello se desarrollara un Script en Grads para poder extraer la información y convertirla en formato ASCII, este formato es compatible con hojas de cálculos como Microsoft Excel o Statistical Package for the Social Sciences (Spss) que posteriormente serán utilizados.

Debido a la dificultad que traería descargar la información de cada cuadrícula para cada día de los 37 años de monitoreo de sus 4 variables, se recurre a desarrollar un Script (Cusco.gs) que automatice el procedimiento y genere 42 hojas de texto por año; de tal forma se reduce las horas de trabajo y se ordena adecuadamente la información clasificándola por cuadrante y año de prueba.

En la Figura 13 se puede identificar a los 11 archivos con los que se ha trabajado hasta el momento: cusco, ECMWF.nc, Limites_Cusco, P-0F12.nc, provincias.dbf, provincias.prj, provincias.sbn, provincias.sbx, provincias.shp, provincias y provincias.shx.

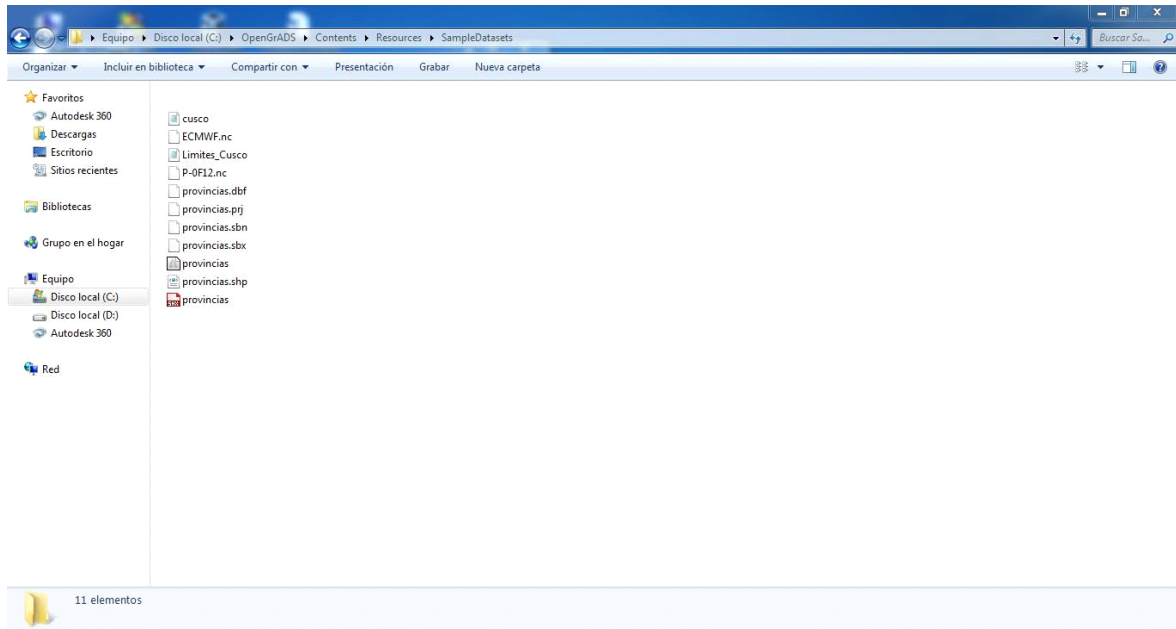


Figura 13: Archivos en la carpeta SampleDatasets

El archivo Cusco.gs realiza un llamado de ejecución al año que se va a evaluar. Como se muestra en la Figura 14 se apertura la secuencia solamente para el año 1979 (Y79), el software Grads reconocerá la orden y buscará dentro de su carpeta “Scripts” (Figura 15) los archivos necesarios para extraer la información.

```

*****
*
*                               Extraccion de datos
*                               para Cusco
*
*****
*      Descripcion:
* Este script consiste en la extraccion de la informacion
* meteorologica del modelo ECMFW en formato NETCDF a ASCII.
* La informacion consistira en la de las principales variables
* meteorologicas (Temperatura, Humedad Relativa, Viento y Lluvia).
* La data extraida tiene un record de 37 anos (1979-2015).
*****
'reinit'
'y79'
!'y80'
!'y81'
!'y82'
!'y83'
!'y84'
!'y85'
!'y86'
!'y87'
!'y88'
!'y89'
!'y90'
!'y91'
!'y92'
!'y93'
!'y94'
!'y95'
!'y96'
!'y97'
!'y98'
!'y99'
!'y00'
!'y01'
!'y02'
!'y03'
!'y04'
!'y05'
!'y06'
!'y07'
!'y08'
!'y09'
!'y10'
!'y11'
!'y12'
!'y13'
!'y14'
!'y15'

```

Figura 14: Ejecutor principal del proceso de extracción de información meteorológica. En este caso se apertura el archivo y79, el cual indica trabajar en el año 1979; mientras que las demás sentencias están deshabilitadas por el carácter “!”.

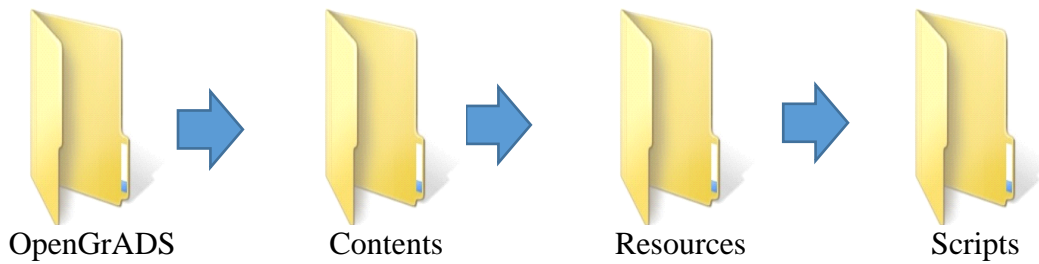


Figura 15: Ruta de trabajo secundario en OpenGrads

Dentro de esta última carpeta (Script) será necesario crear 37 archivos idénticos al modelo de la Figura 16, con la única diferencia de que para cada caso será necesario editar en el primer párrafo la terminación y79 por las siguientes: y79, y80, y81, y82, y83, y84, y85, y86, y87, y88, y89, y90, y91, y92, y93, y94, y95, y96, y97, y98, y99, y00, y01, y02, y03, y04, y05, y06, y07, y08, y09, y10, y11, y12, y13, y14 e y15. En donde la letra “y” hace referencia al año (Year) y la numeración a la terminación de los últimos dígitos del año a evaluar. Estos archivos tienen dos funciones; la primera es establecer la redefinición de las variables y la segunda es reconocer el año en la cual se va a trabajar para al final invocar la apertura a los 42 archivos grillas que contengan la información meteorológica del área de trabajo.

Los archivos tendrán la estructura de un modelo base (Figura 17) para cada caso particular de grillaje se cambiará en la primera línea g1 por: g1, g2, g3, g4, g5, g6, g7, g8, g9, g10, g12, g13, g14, g15, g16, g17, g18, g19, g20, g21, g22, g23, g24, g25, g26, g27, g28, g29, g30, g31, g32, g33, g34, g35, g36, g37, g38, g39, g40, g41 y g42. Donde la letra “g” hace referencia a grilla y los dos dígitos a la enumeración correspondiente. La función principal que desarrollaran será la de extracción de información binaria del modelo y llevarla a una codificación ASCII compatible a un archivo de texto; los resultados serán estructurados en salidas de 4 columnas con data meteorológica (Temperatura del aire, Humedad Relativa, Velocidad del viento y Lluvia) de cada grilla y será necesario repetir el proceso para los 37 años de evaluación (1979-2015).

```

function g1 ( args )

'set lon 285.75'
'set lat -11.25'

outfile='g1.txt'
'!rm g1.txt'

'set gxout print'

fmt='%8.2f'
numcols=20
'set prnopts 'fmt' 'numcols' 1'

'd t'
v1_data = result
'd h'
v2_data = result
'd v'
v3_data = result
'd pc'
v4_data = result

i=1
while (1)
  line1 = sublin(v1_data,i)
  line2 = sublin(v2_data,i)
  line3 = sublin(v3_data,i)
  line4 = sublin(v4_data,i)

  if (line1='' | line2='' | line3='' | line4='');break;endif
  if (i>1)
    j=1
    while (j<=numcols)
      str = subwrd(line1,j); v1 = math_format(fmt,str)
      str = subwrd(line2,j); v2 = math_format(fmt,str)
      str = subwrd(line3,j); v3 = math_format(fmt,str)
      str = subwrd(line4,j); v4 = math_format(fmt,str)

      record = v1' 'v2' 'v3' 'v4'
      rc = write(outfile,record,append)
      j=j+1
    endwhile
  endif
  i=i+1
endwhile

```

Figura 17: Archivo con las órdenes de exportación de información meteorológica

3.8 Procesamiento del código y estructuración de datos

Con los datos meteorológicos obtenidos del proceso de extracción del punto anterior se cuenta con 42 archivos por año; repitiendo el proceso para los 37 años de evaluación (1979-2015) concretando un total de 1 739 archivos. La información de cada grilla será procesada con el código fuente realizado en lenguaje fortran 90 y verificado según bibliografía. Los resultados del proceso serán archivos de texto por año, conteniendo los cálculos de subíndices (Código de humedad del combustible fino, Contenido de humedad del mantillo, Código de Sequía, Índice de propagación inicial, Índice de combustible disponible) y al Índice Meteorológico de Incendios Forestales. Se procederá a estructurar la información meteorológica y de los códigos del índice en una sola carpeta de trabajo que contenga 37 hojas de cálculo de formato Excel, nombradas por el año de evaluación, que identifiquen los resultados de las 42 grillas.

3.9 Criterio por extensión para la asignación de cuadrantes

Era-Interim intenta simplificar la dinámica atmosférica en un conjunto de ecuaciones numéricas que intenta establecer físicamente las condiciones meteorológicas del entorno, el objetivo es poder establecer representatividad de por lo menos un parámetro meteorológico dentro de una rejilla de trabajo. Debido a la distribución por mallas de $0,75^{\circ} \times 0,75^{\circ}$ se obtienen cuadrantes simétricamente distribuidos, los cuales en algunos casos no llegan a encajar dentro de cada provincia, habiendo casos donde será necesario emplear dos a más cuadrantes para abarcar la totalidad de la extensión geográfica o donde un solo cuadrante recoja representatividad de dos a más provincias.

3.10 Criterio por incidencia de incendio para la asignación de cuadrantes

Una vez reconocido los cuadrantes que contienen al departamento de Cusco será necesario volver a seleccionar de este grupo a los que sean representativos por incidencia de incendio. Para ello se georreferenciará los incendios en base a los distritos en donde se registraron cada uno de los incidentes para el periodo de prueba 1995-2014.

3.11 Espacio temporal de incendios

El análisis para los datos de incendios forestales en Cusco nos limita a una muestra de 20 años (1995-2014), que fue recopilada de instituciones públicas y privadas. Para este periodo se procederá a establecer cinco líneas de tiempo; en cada una de éstas se podrá establecer una relación entre los índices e incendios con la época del año. Para la separación de periodos y estaciones del año se tomará en cuenta el inicio y fin del calendario meteorológico.

Tabla 5: Definición de las líneas de tiempo

Periodo	Intervalo de Tiempo
Serie	Desde el 21/12/94 al 21/03/2015
Verano	Grupos del 21 de Diciembre al 21 de Marzo
Otoño	Grupos del 21 de Marzo al 21 de Junio
Invierno	Grupos del 21 de Junio al 23 Setiembre
Primavera	Grupos del 23 Setiembre al 21 de Diciembre

3.12 Intervalos de clases

Bajo el criterio de categorización de las variables “FWI” y “FFMC” propuesta por Van Wagner (1987) se procede a redefinir la serie de datos obtenidos por cuadrantes representativos de Cusco para las cinco series temporales establecidas desde 1994 al 2015. Para el “Fire Weather Index” se definió cinco clases de peligros basados en el concepto de intensidad del incendio y de la dificultad de extinción para los combustibles forestales, citando cada uno de estos:

Clase 1: Muy bajo

Los incendios producidos no logran mantenerse debido a las altas condiciones de humedad de los combustibles forestales en superficie así como de un fácil trabajo de extinción ya que el incendio no tiende a expandirse más allá de su foco primario. En esta clase no es visible la longitud de la llama.

Clase 2: Bajo

Los combustibles forestales pueden llegar a sostener una ignición. El avance del fuego es lento y la extinción del mismo es fácil si es que se trabaja adecuadamente. Los combatientes pueden emplear instrumentos manuales para la extinción. La longitud de la llama es de aproximadamente 1,3 metros.

Clase 3: Moderado

Los incendios sucedidos en esta escala son de rápido y vigoroso avance. El control de la incidencia es relativamente difícil si es que no es extinguido durante los primeros estados de la ignición. A partir de esta clase será necesario emplear agua como medida de extinción. La longitud de la llama esta entre 1,4 a 2,5 metros.

Clase 4: Alto

Las condiciones del incendio llegan a ser críticas, se reconoce una intensa superficie de fuego extendiéndose rápidamente en superficie y llegando a verse árboles ardiendo. Solo es posible empezar los trabajos de extinción en la cabecera del incendio si es que la incidencia fuera reportada hace algunos minutos. La dinámica del incendio estará condicionado a la meteorología del lugar, así que el manejo de la incidencia debe considerar las variaciones del tiempo atmosférico. La longitud de la llama está entre 2,6 a 3,5 metros.

Clase 5: Extremo

Situación súper crítica. Se generan incendios violentos de rápida velocidad de propagación y aparecen focos secundarios debido a la gran intensidad que genera esa clase. Las condiciones meteorológicas son propicias para el desarrollo convectivo del incendio. El fuego tiende a saltarse caminos y fajas corta fuego dejando un alto grado de peligrosidad tanto para personas y propiedades. No es posible un ataque directo, solo es manejable por profesionales (bomberos) en los primeros minutos de ignición y se debe actuar con suma precaución. La longitud de la llama es mayor a los 3,6 metros.

Tabla 6: Rangos cuantitativos y cualitativos del Fire Weather Index

Clase	FWI
Muy bajo	0 - 1
Bajo	2 - 5
Moderado	6 - 12
Alto	13 - 24
Extremo	> 24

FUENTE: Categorización tomada de Van Wagner 1982.

Los resultados serán expresados en histogramas y tablas de frecuencias, estos estarán clasificados bajo los categóricos previamente definidos.

3.14 PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE DE LA VARIABLE FWI

Una prueba de bondad de ajuste sirve para evaluar que tan bien se acomoda la distribución de frecuencias de una muestra observada a una teórica; para afirmar estadísticamente este supuesto será necesario validar la hipótesis nula, la cual indica simplemente que la muestra proviene de una distribución en particular, si el estadístico de prueba es refutado se asume la hipótesis alterna.

Se procede a realizar pruebas de ajuste a una distribución específica al total de datos diarios evaluados desde el 21 de Diciembre de 1994 al 21 de Marzo del 2015 para las siete grillas representativas del territorio Cusqueño.

3.15 PRUEBA DE DISTRIBUCIÓN NORMAL

La prueba de contraste Kolmogorov-Smirnov (K-S) no solo ayuda a identificar una distribución normal, sino que también ayuda a diferenciar posteriores pruebas, que pueden ser de tipo paramétricas o no paramétricas. Considerando a la variable “FWI” como una serie numérica de valores diarios es aplicable la prueba K-S en su versión modificada de Lilliefors. La prueba será ejecutada para las 18 grillas representativas del departamento cusqueño empleando el software SPSS.

Trabajando a un nivel de significancia del 95% se determina la validez de la hipótesis nula, la cual indica una distribución normal de las frecuencias, si el valor del nivel crítico (p-valor) obtenido de la prueba es menor a 0,05 se rechaza la hipótesis nula.

3.16 PRUEBA DE DISTRIBUCIÓN CHI CUADRADO

Esta prueba no paramétrica se desarrolla para una muestra categórica y verifica si la distribución de los datos observados se ajusta a una distribución de frecuencia determinada. Si buscamos evidenciar estadísticamente que la variable Fire Weather Index presenta variación de sus valores en el tiempo y no permanece constante a lo largo del año, podríamos aplicar la prueba de Chi cuadrado de categóricos iguales, de esta forma al plantear la hipótesis nula “La variable FWI reporta valores iguales todos los días del año” pudiendo constatar con el p-valor la validez del enunciado, así como la interpretación de la prueba.

3.17 CLASIFICACIÓN DE LOS INCENDIOS EN BASE AL ÍNDICE FWI

Considerando la asignación del incidente registrado por grilla se procede a establecer una tabla cruzada donde se pueda identificar la categorización en base al índice “FWI”, para ello será necesario establecer una secuencia diaria de los datos. Para el periodo de estudio será considerando solamente los meses donde se registró incendio alguno (Junio, Julio, Agosto, Setiembre, Octubre y Noviembre) desde 1995 al 2014.

Se anexa también a esta serie el registro de incendio, la variable se desarrolla de forma dicotómica donde para un registro positivo se asume el valor de “Si” caso contrario se asigna “No”.

3.18 ANÁLISIS CLIMATOLÓGICO DEL MODELO

Teniendo el registro climatológico (37 años) del Fire Weather Index es posible generar un análisis multianual con los valores promedios mensuales de todas las grillas analizadas (42). Para ello se crea una hoja de cálculo en Excel (Climatologico.xls), donde se recopila tal información y se genera un promedio aritmético simple por grilla para un determinado mes, el resultado será una matriz de datos que representen un solo valor medio por grilla.

La matriz de datos obtenidos será trabajada empleando el sistema de información geográfico ArcGIS. Éste constituye una forma muy efectiva de organizar, comprender y proporcionar grandes cantidades de información de un modo comprensible universalmente mediante su salida gráfica de mapas. Dentro del ArcGIS se apertura el archivo “Climatologico.xls”, en el cual debe estar correctamente georreferenciado cada grilla. Con las herramientas del software se realiza una interpolación simple de los datos, obteniendo finalmente un archivo tipo “Raster” (Figura 18) donde cada pixel expresara un valor interpolado. En la imagen x se ha recortado el archivo raster a partir de los límites provinciales del Cusco, presentándose en un mapa a blanco y negro que dificulta visualmente el reconocimiento de los valores asignados.

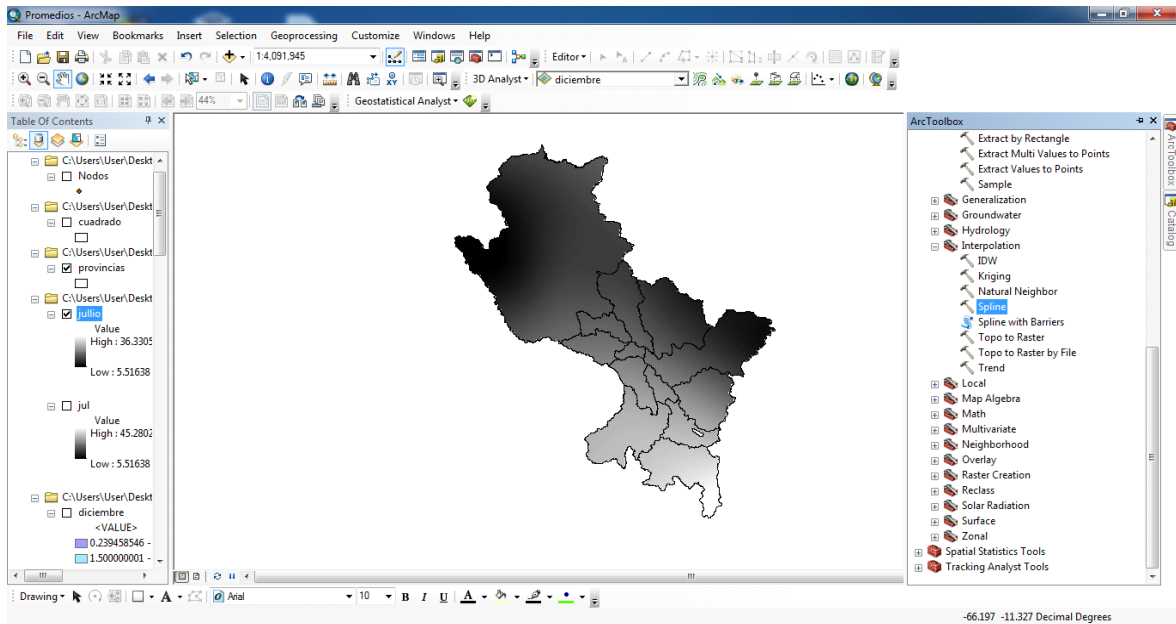


Figura 18: Desarrollo de los Raster “FWI” delimitados para Cusco.

FUENTE: Elaboración propia empleando ArcGIS.

Seguidamente se realiza una reclasificación del “raster” para establecer una escala de peligro de incendio forestal para cinco categorías (Chandler, 1983). Al finalizar se obtienen 12 mapas climáticos de la variable FWI representativos para cada mes del año donde visualmente es más fácil determinar y reconocer el nivel de desarrollo de un incendio forestal en función de las condiciones meteorológicas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CÓDIGO FUENTE

En la Figura 19 se presenta el código fuente del Fire Weather Index “FWI” modificado a una condición tropical en lenguaje de programación FORTRAN 90. Se consideró pertinente estructural el código en un solo bloque, donde se dividirá el proceso en 5 subprogramas de códigos previos. Al realizar correctamente la compilación del código se ejecuta y se obtiene un archivo nuevo en formato de texto, el cual contiene los principales índices y subíndices del índice de incendios forestales.


```

!-----
! .                               Codigo Fuente
! .                               FIRE WHEATHER INDEX "FWI"
!-----
! Autor   Julio Francisco Lau Guerra
! Correo  julio1lau0@hotmail.com
! Ultima actualizacion Enero 2016
!-----
! Descripcion:
! El siguiente programa calcula el indice meteorologico de incendios forestales "FWI" a partir de una
! base de datos meteorologicos (Temperatura del aire, Humedad Relativa, Velocidad del viento y Lluvia) en
! un punto especifico de muestreo. El calculo requiere la determinacion de 5 subcodigos previos, los
! cuales son: Codigo de humedad del combustible fino (FFMC), Codigo de humedad del hojarasca (DNC),
! Codigo de sequia (DC), Indice de propagacion inicial (ISI) y el Indice de combustible disponible (BUI).
! La informacion del indice requiere procesar data diaria de las 4 variables meteorologicas mencionadas a
! las 12 horas locales, ademas de ser ininterrumpidas en la serie. El analisis de este codigo sera para un
! periodo de evaluacion de un ano calendario, pudiendo ser menor debido a la temporada de incendios. Al
! final se obtiene el valor del FWI y de un derivado del mismo (DSR) el cual sirve para estimar el grado
! de gravedad diaria.
!-----

```

```

!-----
!                               Variables Meteorologicas
!-----
! T      Temperatura del aire (°C)
! H      Humedad Relativa (%)
! W      Velocidad del viento (km/h)
! ro     Precipitacion liquida acumulada diaria (mm)
! re     Precipitacion efectiva (mm)
!-----

```

```

!-----
!                               Codigo de humedad del combustible fino (FFMC)
!-----
! mo     Contenido de humedad del combustible fino del dia anterior
! mr     Contenido de humedad del combustible fino despues de la lluvia
! m      Contenido de humedad del combustible fino despues del secado
! Ed     Contenido de humedad en equilibrio despues del secado
! Ew     Contenido de humedad en equilibrio despues del humedecimiento
! Ko     Valor intermedio de Kd
! Kd     Velocidad de secado
! Kl     Valor intermedio de kw
! Kw     Velocidad de humedecimiento
! Fo     FFMC del dia anterior
! F      FFMC
!-----

```

```

program FWI
implicit none
integer,parameter::n=365
! "n" representa los 365 dias del ano a analizar
real,parameter:: Le=9,Lf=1.4
! Los dos valores de "Le" y "Lf" son constantes para cada mes, respectivamente.

real ::
mo(n),mr(n),rf(n),Ed(n),Ko(n),Kd(n),Ew(n),Kl(n),Kw(n),m(n),F(n),T(n),H(n),W(n),ro(n),re(n),mp(n),b(n),ma(n),Pr(n),K(n),P(n),rd(n),Qo
(n),Qr(n),Dr(n),V(n),D(n),fw(n),ff(n),R(n),U(n),fd(n),IT(n),s(n),DSR(n)

integer :: i

open(10,file='datos_meteorologicos.txt')
! Apertura del archivo que contenga los datos meteorologicos

do i=1,n
read(10,*)T(i),H(i),W(i),ro(i)

F(0)=85
! Valor de inicio del FFMC

mo(i)=147.2*(101-F(i-1))/(59.5+F(i-1))

if= (ro(i)>0.5) then
rf(i)=ro(i)-0.5

if (mo(i)<=150) then
mr(i)=mo(i)+42.5*rf(i)*exp(-100.0/(251.0-mo(i)))*(1.0-exp(-6.93/rf(i)))
else
mr(i)=mo(i)+42.5*rf(i)*exp(-100.0/(251.0-mo(i)))*(1.0-exp(-6.93/rf(i)))+0.0015*((mo(i)-150)**2)*((rf(i))**0.5)
end if

if (mr(i)>250) then
mr(i)=250
end if

else
rf(i)=ro(i)
end if

if (ro(i)>0.5) then
mo(i)=mr(i)
end if

Ed(i)=0.942*(H(i)**0.679)+11.0*exp((H(i)-100.0)/10.0)+0.18*(21.1-T(i))*(1-exp(-0.115*H(i)))

if (mo(i)>Ed(i)) then
Ko(i)=0.424*(1.0-(H(i)/100)**1.7)+0.0694*(W(i)**0.5)*(1-(H(i)/100)**8)
Kd(i)=ko(i)*0.581*exp(0.0365*T(i))
m(i)=Ed(i)+(mo(i)-Ed(i))*10**(-Kd(i))
end if

if (mo(i)<Ed(i)) then
Ew(i)=0.618*(H(i)**0.753)+10.0*exp((H(i)-100.0)/10.0)+0.18*(21.1-T(i))*(1-exp(-0.115*H(i)))
end if

if (mo(i)<Ew(i)) then
Kl(i)=0.424*(1.0-((100-H(i))/100)**1.7)+0.0694*(W(i)**0.5)*(1-(((100-H(i))/100)**8)
Kw(i)=Kl(i)*0.581*exp(0.0365*T(i))
m(i)=Ew(i)-(Ew(i)-mo(i))*10**(-Kw(i))
end if

if ((Ed(i)>=mo(i)).and.(mo(i)>=Ew(i)))then
m(i)=mo(i)
end if
F(i)=59.5*(250.0-m(i))/(147.2+m(i))

```

```

! .....
!                              Codigo de humedad del hojarasca (DMC)
! .....
!
!      Mo      Contenido de humedad de la hojarasca del dia anterior
!      Mr      Contenido de humedad de la hojarasca despues de la lluvia
!      M        Contenido de humedad de la hojarasca despues del secado
!      K        Velocidad de secado logaritmico
!      Le      Longitud efectiva del dia para DMC
!      b        Factor de pendiente
!      Po      DMC del dia anterior
!      Pr      DMC despues de la lluvia
!      P        DMC
! .....

P(0)=6.0
! Valor de inicio del DMC

if (ro(i)>1.5) then
re(i)=0.92*ro(i)-1.27
mp(i)=20+exp(5.6348-P(i-1)/43.43)

if (P(i-1)<=33) then
b(i)=100/(0.5+0.3*P(i-1))
else if (P(i-1)>65) then
b(i)=6.2*log(P(i-1))-17.2
else
b(i)=14-1.3*log(P(i-1))
end if

ma(i)=mp(i)+1000*re(i)/(48.77+b(i)*re(i))
Pr(i)=244.72-43.43*log(ma(i)-20)

if (Pr(i)<0) then
Pr(i)=0
end if

if (T(i)<-1.1) then
T(i)=-1.1
end if

K(i)=1.894*(T(i)+1.1)*(100-H(i))*(Le)*0.000001
P(i)=Pr(i)+100*K(i)

else

if (T(i)<-1.1) then
T(i)=-1.1
end if

K(i)=1.894*(T(i)+1.1)*(100-H(i))*(Le)*0.000001
P(i)=P(i-1)+100*K(i)

end if

! .....
!                              Codigo de Sequia (DC)
! .....
!
!      Q        Humedad equivalente DC
!      Qo      Humedad equivalente DC del dia anterior
!      Qr      Humedad equivalente despues de la lluvia
!      V        Evapotranspiracion
!      Lf      Longitud efectiva del dia para DC
!      Do      DC del dia anterior
!      Dr      DC despues de la lluvia
!      D        DC
! .....

D(0)=15
! Valor de inicio del DC

if (T(i)<-2.8) then
T(i)=-2.8
end if

V(i)=0.36*(T(i)+2.8)+Lf

if (V(i)<0) then
V(i)=0
end if

if (ro(i)>2.8) then
rd(i)=0.83*ro(i)-1.27
Qo(i)=800*exp(-D(i-1)/400)
Qr(i)=Qo(i)+3.937*rd(i)
Dr(i)=400*log(800/Qr(i))

if (Dr(i)<0) then
Dr(i)=0
end if
D(i)=Dr(i)+0.5*V(i)

else
D(i)=D(i-1)+0.5*V(i)
end if

```

<< A continuación>>

```
! .....
!                                     Indices del comportamiento del fuego (ISI,BUI,FWI,DSR)
! .....
!
!      f(W)      Factor del viento
!      f(F)      Factor de humedad del combustible fino
!      f(D)      Factor de humedad de hojarasca
!      R         Indice de propagacion (ISI)
!      U         Indice de combustible (BUI)
!      IT        Forma intermedia del FWI
!      S         Indice meteorologico de incendios forestales (FWI)
!      D         DC
!      P         DMC
!      DSR       Valoracion de la gravedad diaria (DSR)
!
!
!
!      fw(i)=exp(0.05039*W(i))
!      ff(i)=91.9*exp(-0.1386*m(i))*(1+(m(i)**5.31)/(4.93*10**7))
!      R(i)=0.208*fw(i)*ff(i)
!
!      if (P(i)>0.4*D(i)) then
!        U(i)=P(i)-(1-0.8*D(i)/(P(i)+0.4*D(i)))*(0.92+(0.0114*P(i)**1.7))
!      else
!        U(i)=0.8*P(i)*D(i)/(P(i)+0.4*D(i))
!      end if
!
!
!      if (U(i)>80) then
!        fd(i)=1000/(25+108.64*exp(-0.023*U(i)))
!      else
!        fd(i)=0.626*U(i)**0.809+2
!      end if
!
!      IT(i)=0.1*R(i)*fd(i)
!
!      if (IT(i)>1) then
!        s(i)=exp(2.72*(0.434*log(IT(i))**0.647)
!      else
!        s(i)=IT(i)
!      end if
!
!      DSR(i)=0.0272*(s(i))**1.77
!
! .....
!                                     Apertura de un archivo con los resultados obtenidos
! .....
!
!      Open(30,file='Resultados.txt')
!      write(30,'(F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2)') F(i),P(i),D(i),R(i),U(i),s(i),DSR(i)
! .....
!
! .....
!                                     Formato de salida
! .....
!
!      write(*,'(F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2,4X,F7.2)') F(i),P(i),D(i),R(i),U(i),s(i),DSR(i)
! .....
!
!
!      end do
!      stop
!      end program
```

Figura 19: Programa de cálculo del Índice Meteorológico de Incendios Forestales.
FUENTE: Elaboración propia en lenguaje de programación Fortran 90.

4.2 Verificación del código fuente

En la Figura 20 se realiza una comparación los datos extraídos del código fuente con la bibliografía de Van Wagner. La ventana de fondo negro muestra los resultados obtenidos en el código fuente mientras las tablas con datos de fondo blanco muestran los valores referenciales de una muestra bibliográfica. La prueba de validación consistió en la comparación aleatoria de tres resultados al azar de las variables: “FFMC”, “DMC” y “DC”. De la prueba se obtuvieron datos satisfactorios entre los datos observados con los esperados, por lo que el código propuesto es válido para ser trabajado en el desarrollo de la presente investigación.

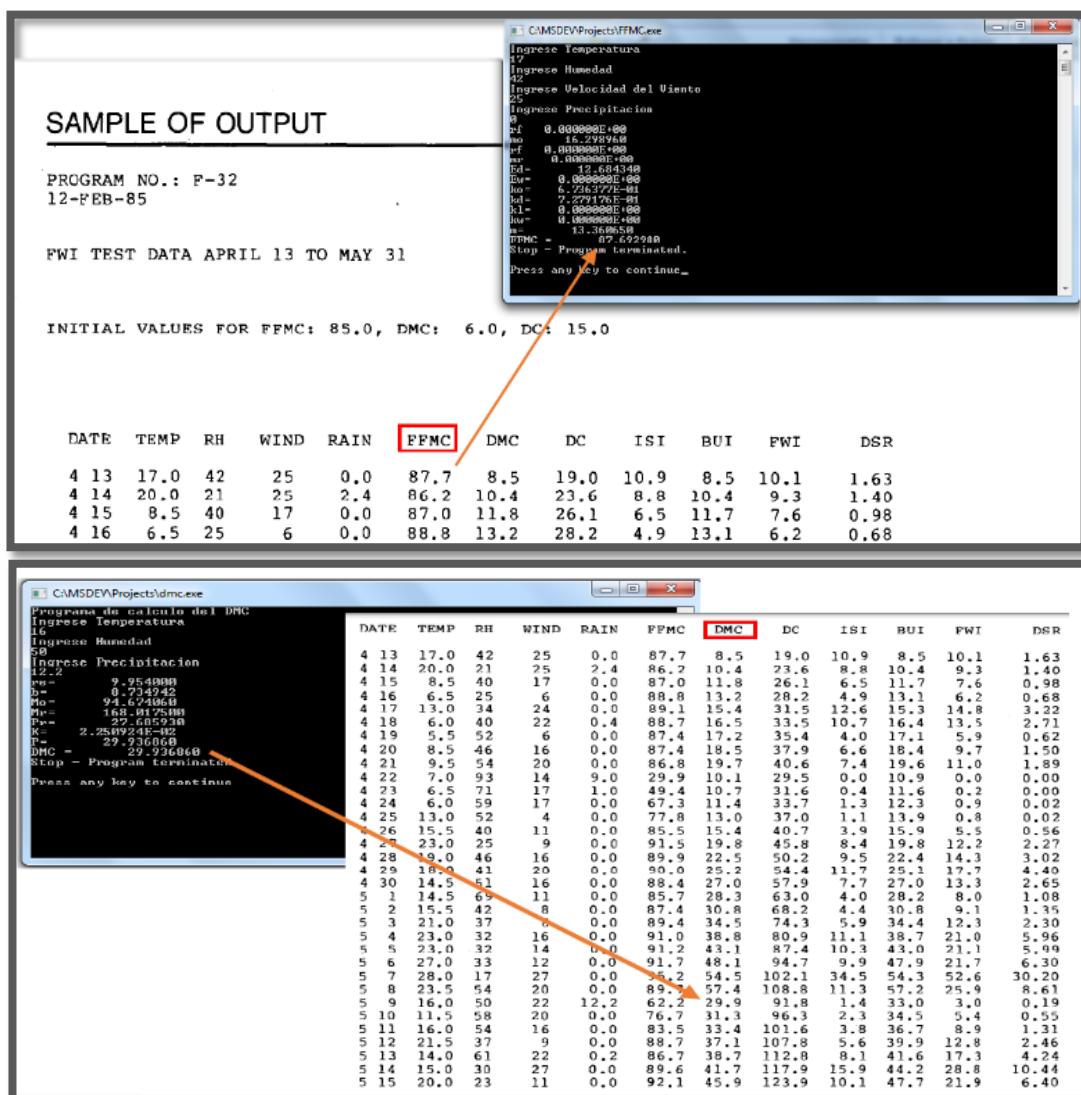


Figura 20: Validación del código fuente en base la comparación de tres resultados satisfactorios. Datos bibliográficos (87,7; 29,9; 29,5). Datos obtenidos (87,69298; 29,93686; 29,52855).

4.3 Descarga de data meteorológica del modelo ERA-INTERIM

Al tener acceso al servidor del ECMWF se puede descargar datos meteorológicos en hasta dos tipos de formatos: Gridded Binary (GRIB) o Network Common Data Form (NetCDF). Para facilitar el trabajo del investigador se recomienda el formato NetCDF, debido a que es abiertamente compatible con los principales softwares de edición y/o visualización de datos.

The screenshot displays the ECMWF website interface for downloading ERA Interim, Daily data. The top navigation bar includes 'Home', 'Chart dashboard', 'Contact', and a search bar. The main content area is titled 'ERA Interim, Daily' and contains several selection steps:

- Select date:** A date range selector set to '1979-01-01' to '2016-05-31'.
- Select a list of months:** A grid of years (1979-2015) and months (Jan-Dec) with checkboxes for selection.
- Select time:** Radio buttons for time intervals: 00:00:00, 06:00:00, 12:00:00, and 18:00:00.
- Select step:** Radio buttons for time steps: 0, 3, 6, 9, and 12.
- Select parameter:** A list of meteorological parameters with checkboxes, including '2 metre dewpoint temperature', '2 metre temperature', '10 metre U wind component', '10 metre V wind component', '10 metre wind gust since previous post-processing', 'Albedo', 'Boundary layer dissipation', 'Boundary layer height', 'Charnock', and 'Clear sky surface photosynthetically active radiation'.

Figura 21: Plataforma de descarga de datos meteorológicos del proveedor ECMWF.

4.4 EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

En la Figura 22 puede verse la georreferenciación del departamento de Cusco y de sus trece provincias (coloreadas para una mejor visualización) en el software Grads, así mismo se reconocen 42 cuadrantes (matriz de 7x6) los cuales son unidades de información meteorológica para el estudio.

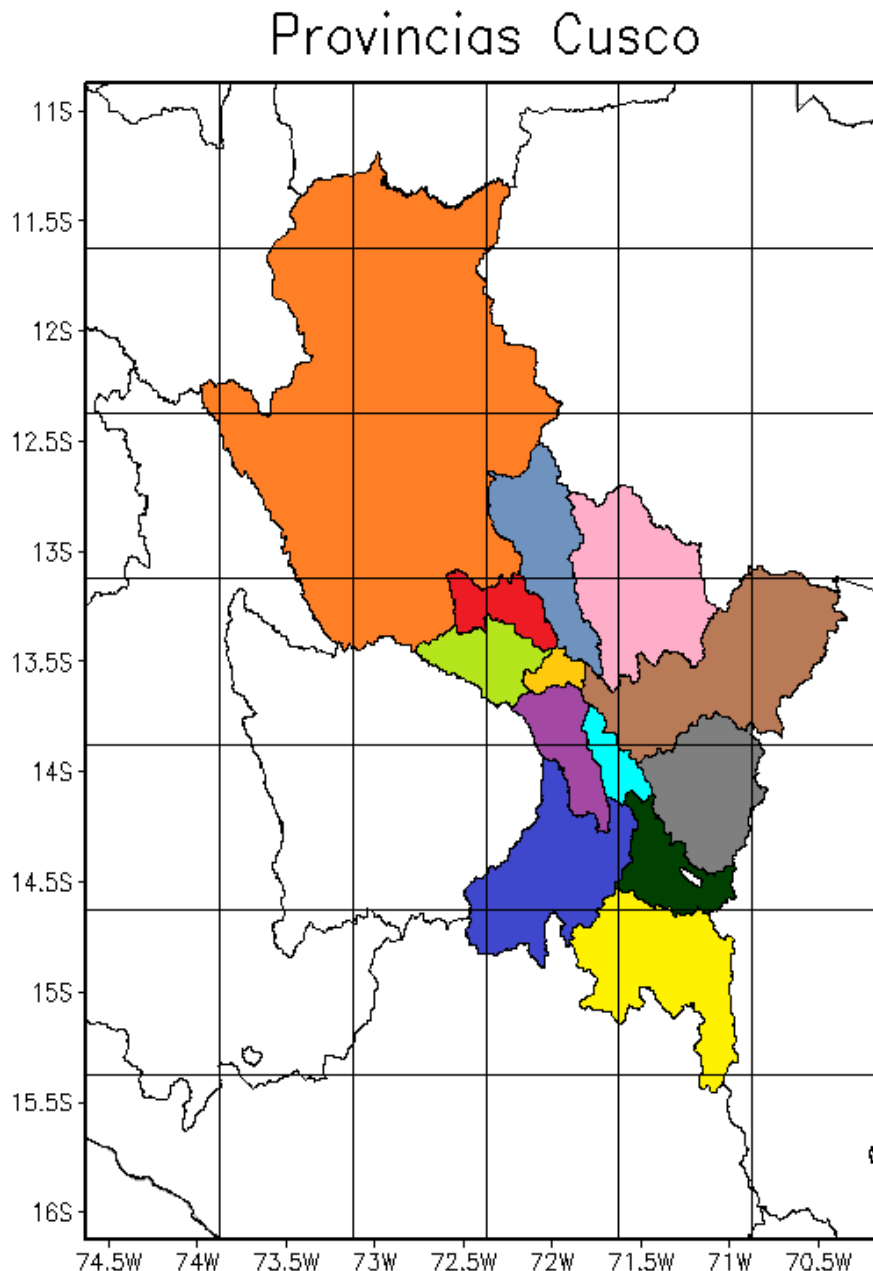


Figura 22: Mapa político del departamento de cusco dividido en 42 cuadrantes de estudio.

FUENTE: Elaboración propia empleando Grads.

En la Figura 23 se muestra la distribución y asignación de los cuadrantes a evaluar, en donde se enumera según el orden establecido por el investigador, partiendo de la parte superior izquierda como “G1” siguiendo un orden vertical descendente y continuar a la siguiente columna con la numeración correlativa; al final se recuenta 42 cuadrillas de evaluación.

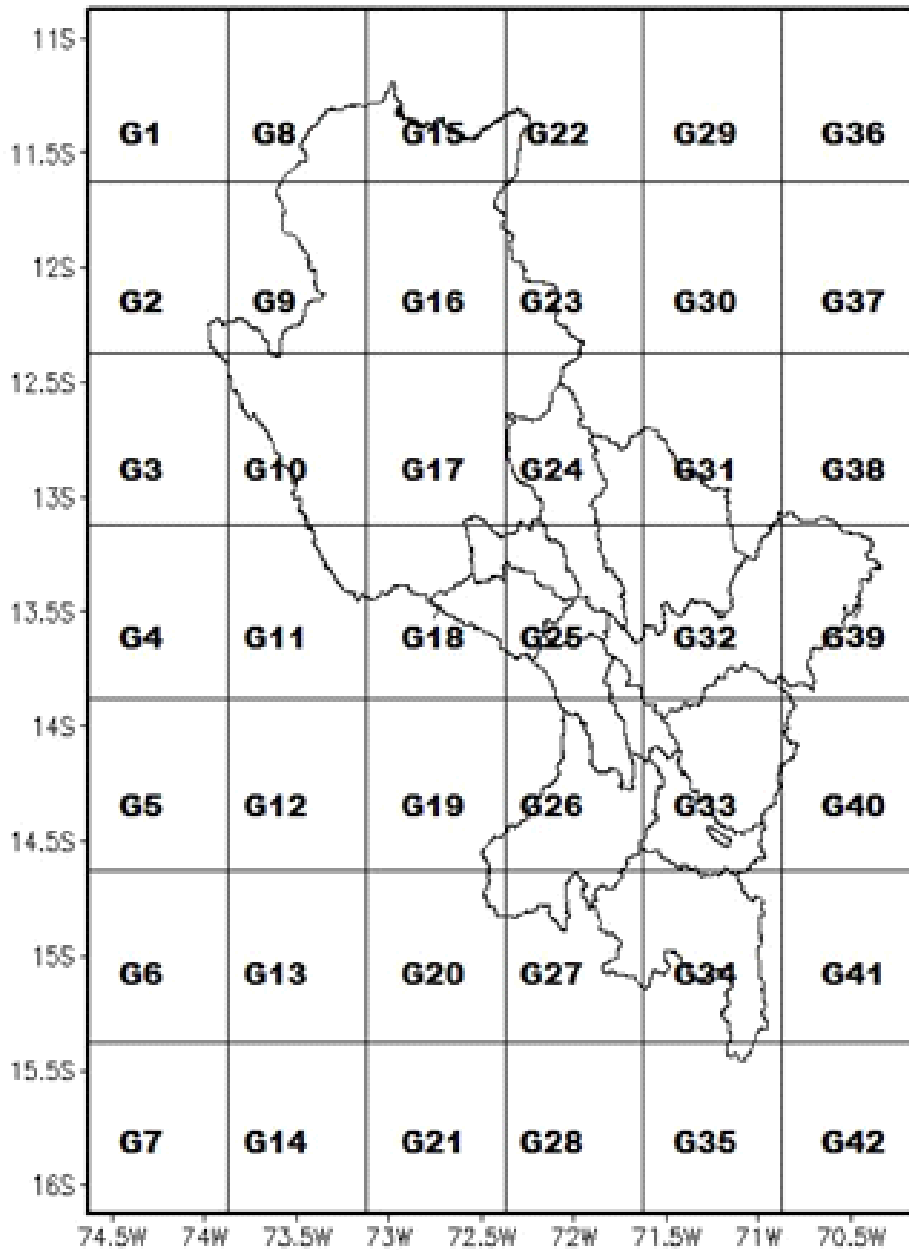


Figura 23: Mapa del área de estudio evaluado en cuadrantes.

FUENTE: Elaboración propia empleando Grads

Al ejecutar la orden de apertura del Script “Cusco.gs” dentro de Grads se desarrolla la secuencia de pasos desarrollados en las Figuras 16 y 17, dando como resultados final 42 archivos de información meteorológica en formato “.txt”, estos archivos son accesibles visualmente en codificación ASCII. El procedimiento debe de realizarse 37 veces para que de esta forma se cuente con el registro de toda la serie temporal a evaluar (1979-2015).

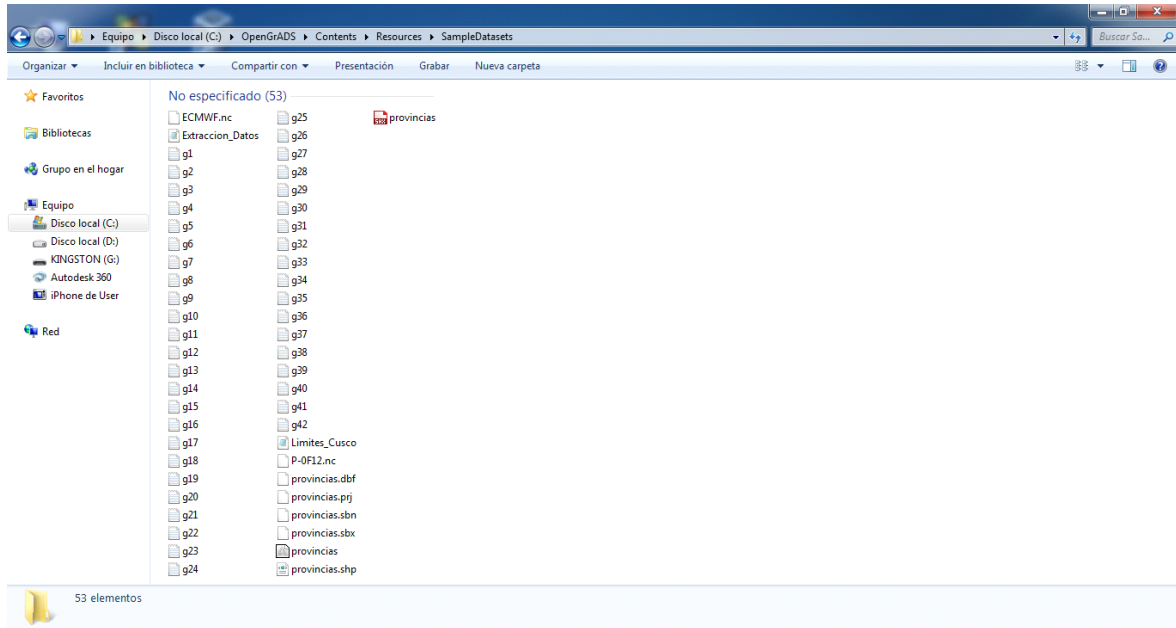


Figura 24: Ruta de trabajo que contiene los 42 archivos meteorológicos del año 1979.

4.5 Procesamiento de datos

En este apartado se muestra los 37 archivos que contienen información meteorológica y códigos del índice meteorológico de incendios forestales canadiense por año de evaluación.

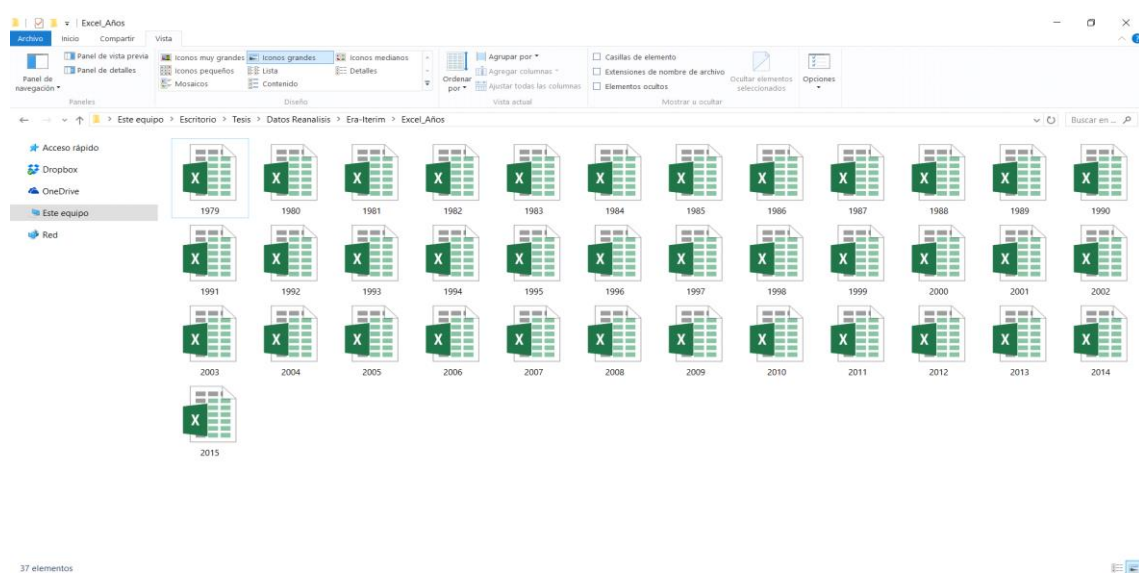


Figura 25: Carpeta “Excel_Años” el cual contiene 37 archivos Excel

4.6 Criterio de elección por extensión

El espacio geográfico Cusqueño no abarca en su totalidad a los 42 cuadrantes, sino que llega a comprender la mitad de los mismos extraídos del modelo Era-Interim los mismo que estarán ligados a por lo menos una provincia determinada. En la tabla 7 se puede ver tal asignación.

Tabla 7: Relación de casillas con provincias cusqueñas.

Provincia	Casillas											
Acomayo	g25	g26	g33									
Anta	g18	g25										
Canas	g33											
Canchis	g32	g33										
Calca	g24	g25										
Cusco	g25											
Chumbivilca	g19	g20	g26	g27	g33							
Espinar	g27	g34										
La Convención	g8	g9	g10	g11	g15	g16	g17	g18	g22	g23	g24	
Paruro	g25	g26										
Paucartambo	g24	g25	g31	g32								
Quispicanchis	g25	g32	g39									
Urubamba	g18	g25										

4.7 Criterio por incidencia

4.7.1 Acomayo

El número de incidentes es bajo (2 eventos) y cada uno de los mismo estaría englobado en las cuadrículas “g26” y “g33” respectivamente.

4.7.2 Anta

La provincia de Anta se ubica geográficamente justo entre los cuadrantes “g18” y “g25”. Se registraron 15 incendios en la temporada de evaluación, estando distribuidos equitativamente ocho incendios en el distrito de Limatambo, ubicado al oeste de la provincia, mientras que los siete incendios restantes se generaron en los distritos del lado este (Anta, Huarcoondo y Zurite). Debido a la existencia de estas dos zonas de peligro se toma la decisión de trabajar independiente en cada caso, asignando los registros de lado este a “g25” y “g18” para el lado oeste.

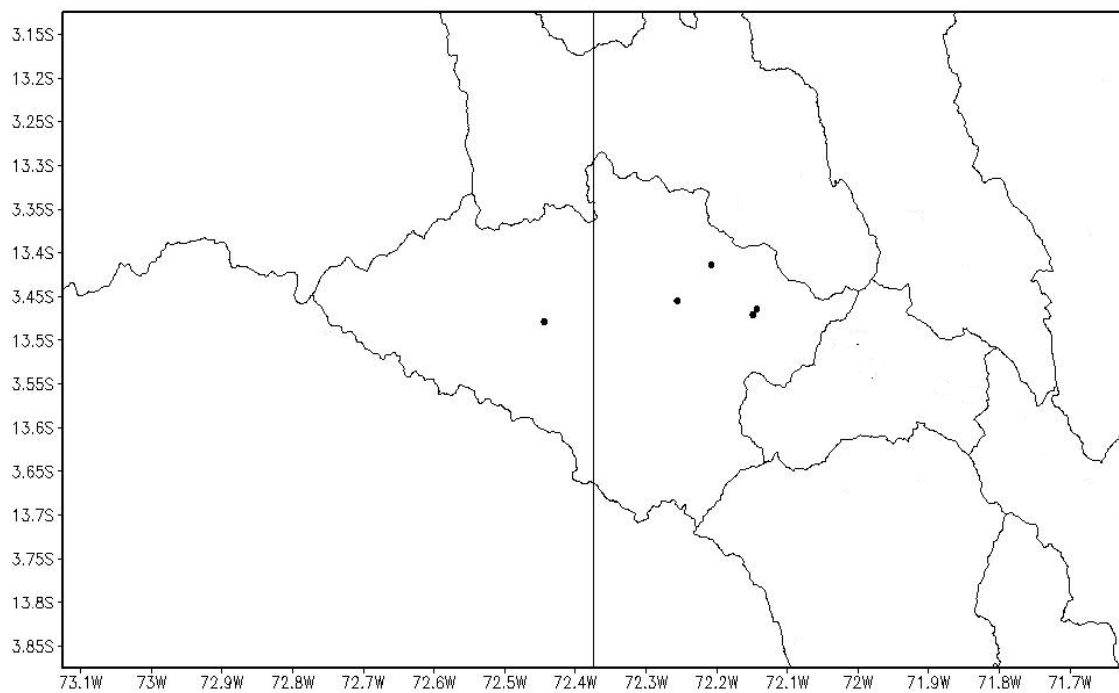


Figura 26: Registro de incendios por distritos en los cuadrantes “g18” y “g25”

4.7.3 Canas – Canchis

Los registros de incendios para las provincias de Canas y Canchis se desarrollan todos dentro del espacio de “g33”, aunque esta última provincia llega a abarcar también al cuadrante “g32”. Sin embargo se identifica que las cumbres elevadas del norte no expresan riesgo alguno debido a la poca existencia de vegetación, por lo que se confirma la decisión de evaluar “g33” como representativo para las dos provincias.

En la figura 27 se observa la distribución espacial de los distritos con registro de incendios para de Canas y Canchis. En el cuadro izquierdo una salida en Grads georreferenciando los puntos y reconociendo el cuadrante “g33”, en la imagen derecha la misma distribución y espacio pero tomada a partir de una imagen satelital Landsat.

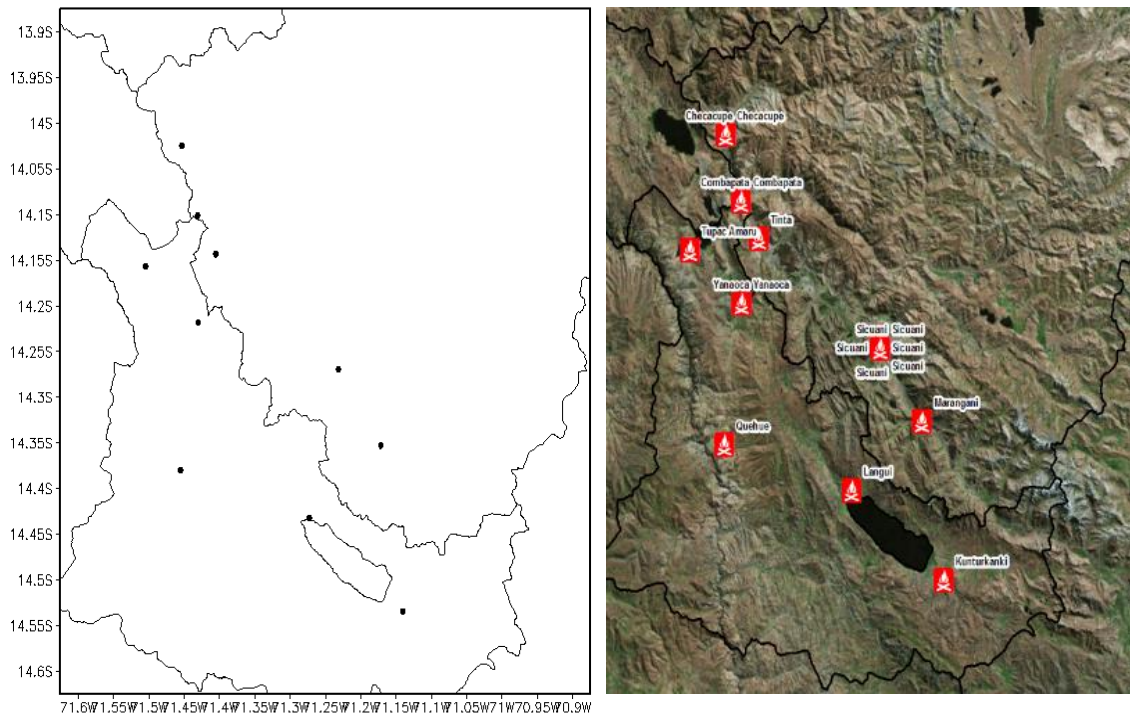


Figura 27: Mapa con los registros de incendios para el cuadrante “g33”. La imagen de la izquierda es una salida en Grads y a la derecha una imagen satelital Landsat

4.7.4 Calca

La provincia de Calca se diferencia por estar dividida en dos zonas; la del norte con clima selvático y de menor altitud mientras que el sur con niveles por encima de los dos mil metros sobre el nivel del mar presenta condiciones meteorológicas del ande. Dentro de la cobertura espacial de la malla del ERA-Interim se cuenta con los cuadrantes “g24” y “g25” para representar cada región respectivamente.

Se reconoce que la mayor cantidad de eventos se concentran en los distrito del sur: Pisac, Lamay, Calca, San Salvador y Taray. Por lo que el criterio de elección supondría escoger “g25” como unidad de muestra para los eventos sucedidos en Calca.

4.7.5 Cusco

Era-Interim encuentra como único cuadrante representativo de la provincia de Cusco a “g25” esto debido a la pequeña extensión territorial (617 km²), encajando solo en esta rejilla del modelo. En la figura 28 se observa la distribución de los 35 incendios registrados; por lo menos una vez registrado en 7 de los ocho distritos de la provincia.

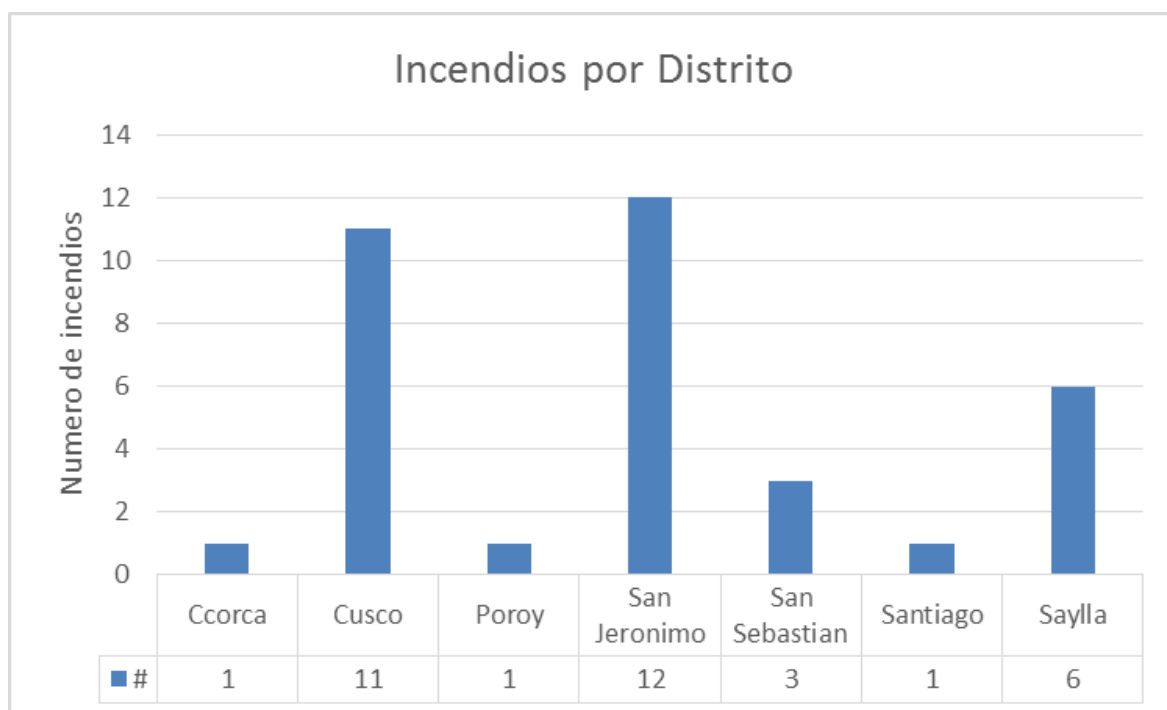


Figura 28: Número de incendios por distritos en la provincia de Cusco (1995-2014).

4.7.6 Chumbivilca

La provincia de Chumbivilca se localiza al sur de Cusco y llega a abarcar significativamente el cuadrante “g26” mientras que una pequeña extensión se reparte para “g19”, “g20”, “g27” y “g33”. Ya que la mayor cantidad de los eventos son registrados en “g26” se elige como grilla de asignación para los registros de Chumbivilcas.

4.7.7 Espinar

La provincia de Espinar se localiza en la parte más septentrional del departamento Cusqueño y debido a encontrarse a un elevado nivel sobre el mar tiene un clima seco y frío la mayor parte del año.

El modelo ERA-Interim identifica a los cuadrantes “g27” y “g34” como representativos del lugar, siendo “g34” el de mayor relevancia ya que concentra los distritos del centro y este de la provincia; donde según los registros de INDECI se efectuó el mayor número de incidencias dentro de la provincia, con excepción de un evento aislado en la zona oeste (01/11/11 - Sucktambo), se decide seleccionar al cuadrante “g34” como base de datos para la provincia de Espinar.

4.7.8 La convención

Es la provincia más grande del Perú, con un relieve accidentado, pero de baja altitud ubicada en la zona más boreal del departamento cusqueño comprendiendo una extensión territorial de aproximadamente 30 mil kilómetros cuadrados. A lo largo del año se tiene un clima tropical reflejado en la alta cobertura forestal, la cual es fácilmente reconocible en imágenes satelitales.

Debido a la gran dimensión de su territorio, el modelo ERA-Interim reconoce hasta 10 cuadrículas (“g8”, “g9”, “g10”, “g15”, “g16”, “g17”, “g18”, “g22”, “g23”, “g24”) para incluirlas dentro de su espacio geográfico; sin embargo la mayor cantidad de incendios se concentraron en los distritos de la zona sur, todo: ellos dentro del cuadrante “g17” por lo que se toma este criterio como decisivo para la elección del cuadrante como unidad de extracción de datos.

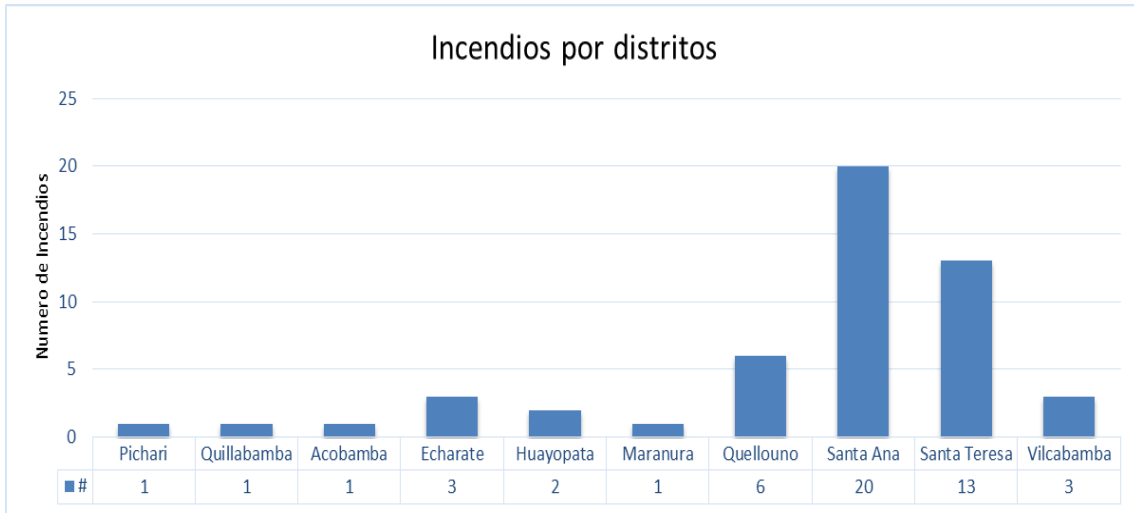


Figura 29: Número de incendios forestales registrados en los distritos de la provincia de La Convención (1995-2014).

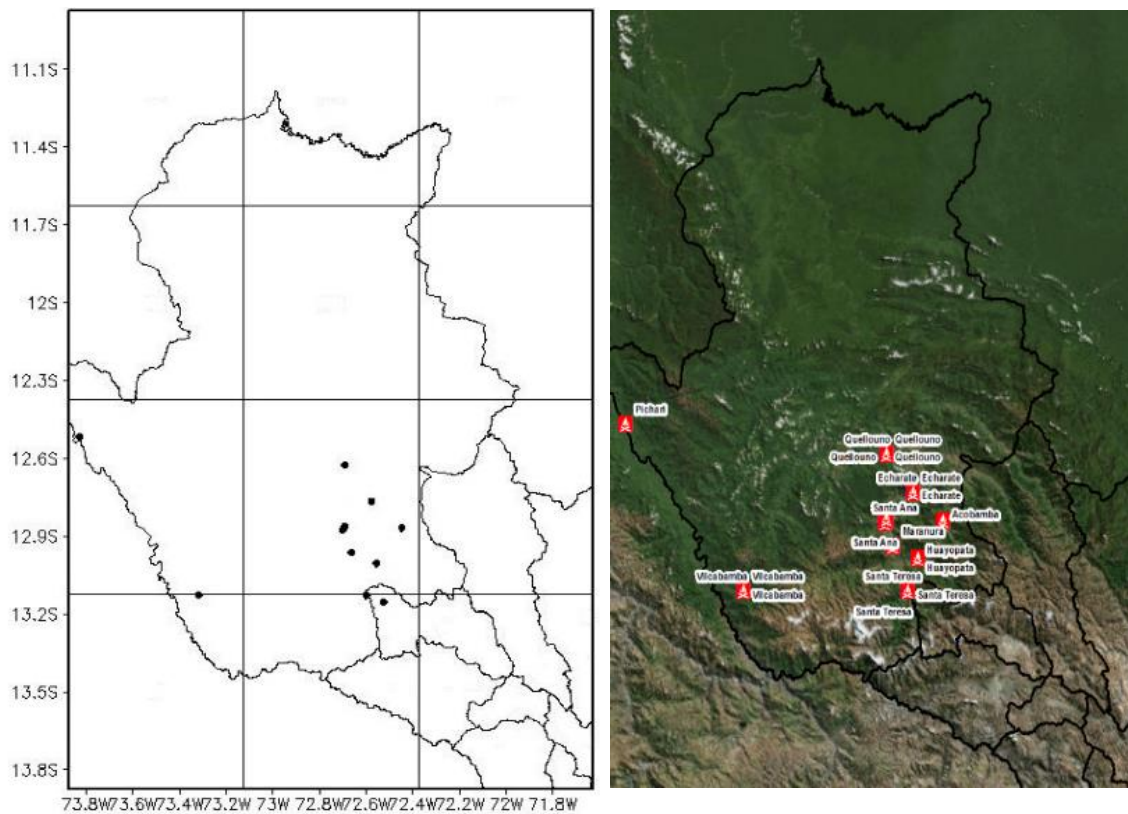


Figura 30: Mapa con los registros de incendios para la provincia de La Convención. A la izquierda una salida en Grads y en la derecha una imagen satelital Landsat.

4.7.9 Paruro

La provincia de Paruro se ubica al margen central-este de la provincia de Cusco y logra comprender a las cuadrículas “g25” y “g26” como parte de su extensión geográfica. El 75% de los incidentes registrados se dieron en cinco de sus nueve distritos: Ccapi, Huanoyrite, Paruro y Yaurisque. Los cuales están ubicados al norte cuadrando exactamente dentro de “g25” mientras que el 25% restante serán registrados en el distrito de Accha en la zona sur, dentro de “g26”. Así que se toma la decisión de optar por cada cuadrante para cada registro respectivo.

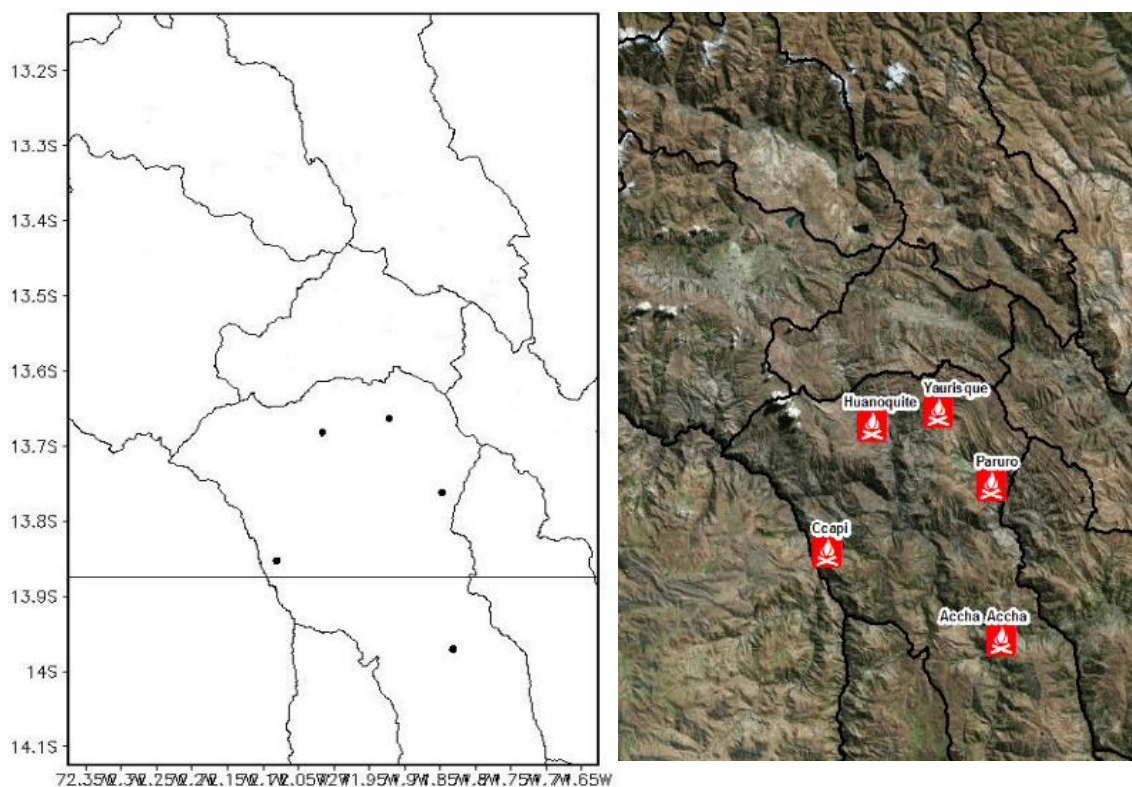


Figura 31: Mapa con los registros de incendios para el distrito de Paruro. A la izquierda una salida en Grads y en la derecha una imagen satelital Landsat.

4.7.10 Paucartambo

La provincia de Paucartambo se localiza geográficamente entre los cuadrantes: “g24” “g25”, “g31” y “g32”. Sin embargo, los distritos que registraron incidentes solo fueron Challabamba, Colquepata y Paucartambo. Las dos primeras dentro de “g25” y la última en “g32”. El criterio de asignación será pues, adicionar el registro de incendios de la provincia de Paucartambo a los de “g25” tomando en consideración la similitud y cercanía (13km) entre las ciudades de Challabamba y Paucartambo.

4.7.11 Quispicanchi

La provincia de Quispicanchi registró 23 incidencias reportadas en la serie de tiempo, un número considerable para ser evaluado. La provincia se localiza en la parte más oriental del departamento de Cusco y abarca una extensión de hasta tres cuadrantes del ERA-Interim ("g25", "g32" y "g39"). Se identifica que el mayor número de incendios son registrados en los distritos del oeste, los cuales están incluidos en "g25" mientras el resto fueron detectados en la zona centro la cual corresponde a "g32". El distrito de Cusipata se ubica dentro del cuadrante "g33" sin embargo será considerado dentro de "g32" por reunir características similar a su distrito vecino Quiquijana, inmerso en "g32" por lo que se incluye en este cuadrante. Por lo tanto se decide en repartir los registros entre estos dos últimos cuadrantes ("g25" y "g32").

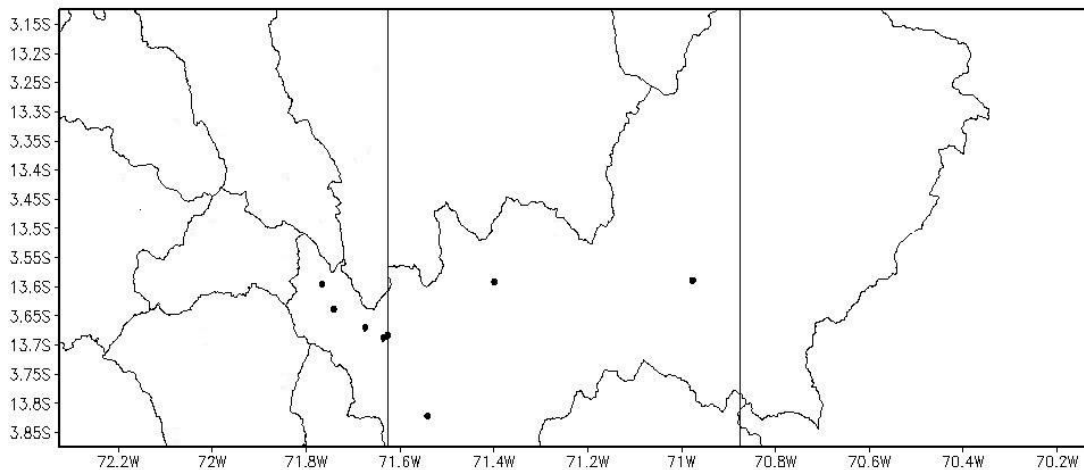


Figura 32: Registro de incendios por distritos. Cuadrantes "g25", "g32" y "g39".

4.7.12 Urubamba

La provincia de Urubamba se encuentra geográficamente dividida en dos regiones, la del oeste con características más de selva y la seca andina de la parte este. De esta forma también se encuentra subdividida en dos regiones por las cuadrículas del ERA-Interim, para los “g18” y “g25”. Las asignaciones de los registros se darán en base a esta característica, los distritos del margen izquierdo serán acoplados a “g18” y los del margen derecho a “g25”.

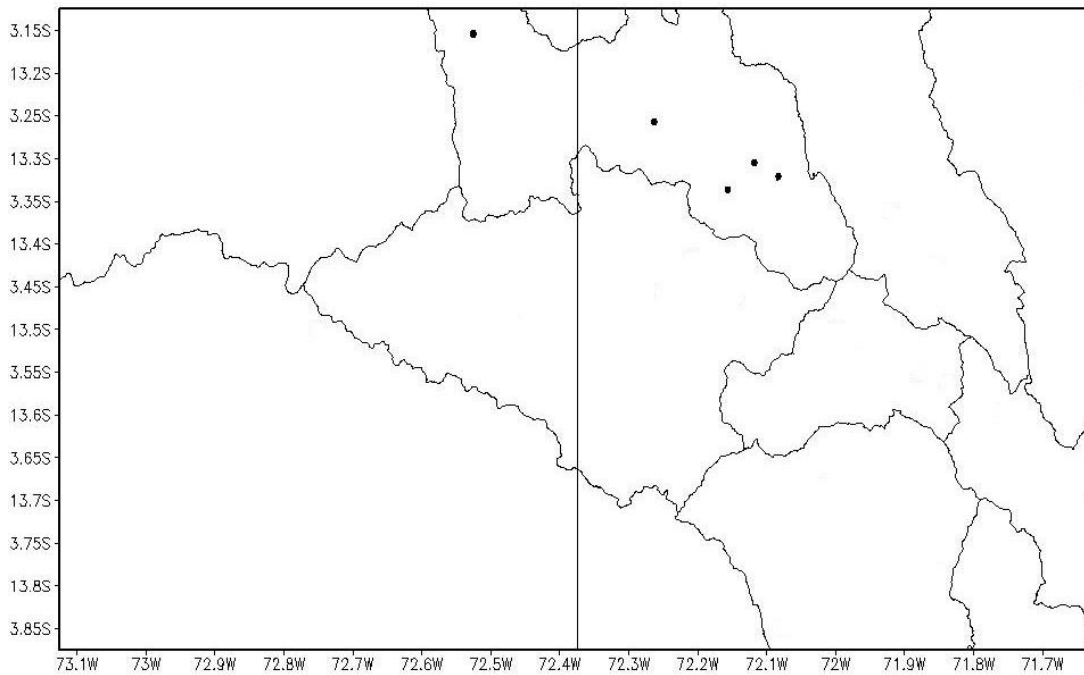


Figura 33: Registro de incendios por distritos en los cuadrantes “g18” y “g25”.

4.8 Grillas representativas

Al finalizar la evaluación de incendios por distritos se obtiene que solamente será necesario emplear siete casillas del ERA-Interim para representar el riesgo por incendio forestal en Cusco, estas grillas son las siguientes: “g17”, “g18”, “g25”, “g26”, “g32”, “g33” y “g34”.

4.9 Espacio temporal de incendios

En la tabla 8 se muestra la distribución de los incendios en función de categorías temporales. Las cuatro categorías superiores hacen referencia a las estaciones del año (Verano, Otoño, Invierno y Primavera) indicando debajo de ellas el número de eventos registrados. En el margen izquierdo se asocia incidencias con los meses de registro.

Durante la temporada de “Verano” no se registra ningún evento en toda su línea de tiempo. En “Otoño” se recopiló 11 incendios que fueron registrados casi en su totalidad la segunda semana del mes de Junio. Esta distribución de incidencias en los últimos días de transición estacional no ayuda a distinguir una marcada representatividad en la estación ya que los incendios se producen cerca de las condiciones de invierno, la cual es sin duda la época del año con la mayor cantidad de incendios forestales, un total de 182 eventos registrados entre los meses de Junio, Julio, Agosto y Setiembre. Para la última temporada en “Primavera” se registraron 59 incidentes, teniendo esta hasta un 70% en estos en el mes de Octubre.

Evaluando las estadísticas registradas se puede considerar a la estación de “Invierno” como temporada de incendios forestales para el departamento de Cusco, donde el mes de Agosto es el crítico seguido de sus meses vecinos (Julio y Setiembre) en la recurrencia de estos desastres. Así mismo estos incendios pueden también desarrollarse en las dos estaciones transicionales, haciendo mención de la mayor representatividad generada en primavera que en otoño.

Tabla 8: Número de incendios registrados por temporada y mes (1995-2014)

Estación		Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Mes	Incendios	0	11	182	59
Enero	0				
Febrero	0				
Marzo	0				
Abril	0				
Mayo	1				
Junio	15				
Julio	34				
Agosto	91				
Setiembre	60				
Octubre	40				
Noviembre	11				
Diciembre	0				

* Revisar Anexos 8 y 9.

El número de incendios registrados desde 1995 al 2014 hace un recuento total de 252 incidentes, los cuales se han documentado por lo menos dos veces en cualquier provincia del departamento de cusqueño. La Convención (51), Urubamba (35), Cusco (35), y Espinar (31) son las provincias con mayor número de registros positivos, así mismo se reconoce que estas son representativas de cada región climática cusqueña. La convención y Urubamba se sitúan en la zona norte con características de selva, Cusco capital del departamento, presenta un clima de transición; mientras que Espinar ubicado en el extremo sur es conocido por ubicarse en una zona alto-andina.

Tabla 9: Número de incendio por provincia. Periodo 1995-2014.

Provincia	Incendio
Acomayo	2
Anta	15
Canas	6
Canchis	15
Calca	25
Cusco	35
Chumbivilcas	3
Espinar	31
La Convención	51
Paruro	6
Paucartambo	5
Quispicanchi	23
Urubamba	35

4.10 Intervalos de Clases

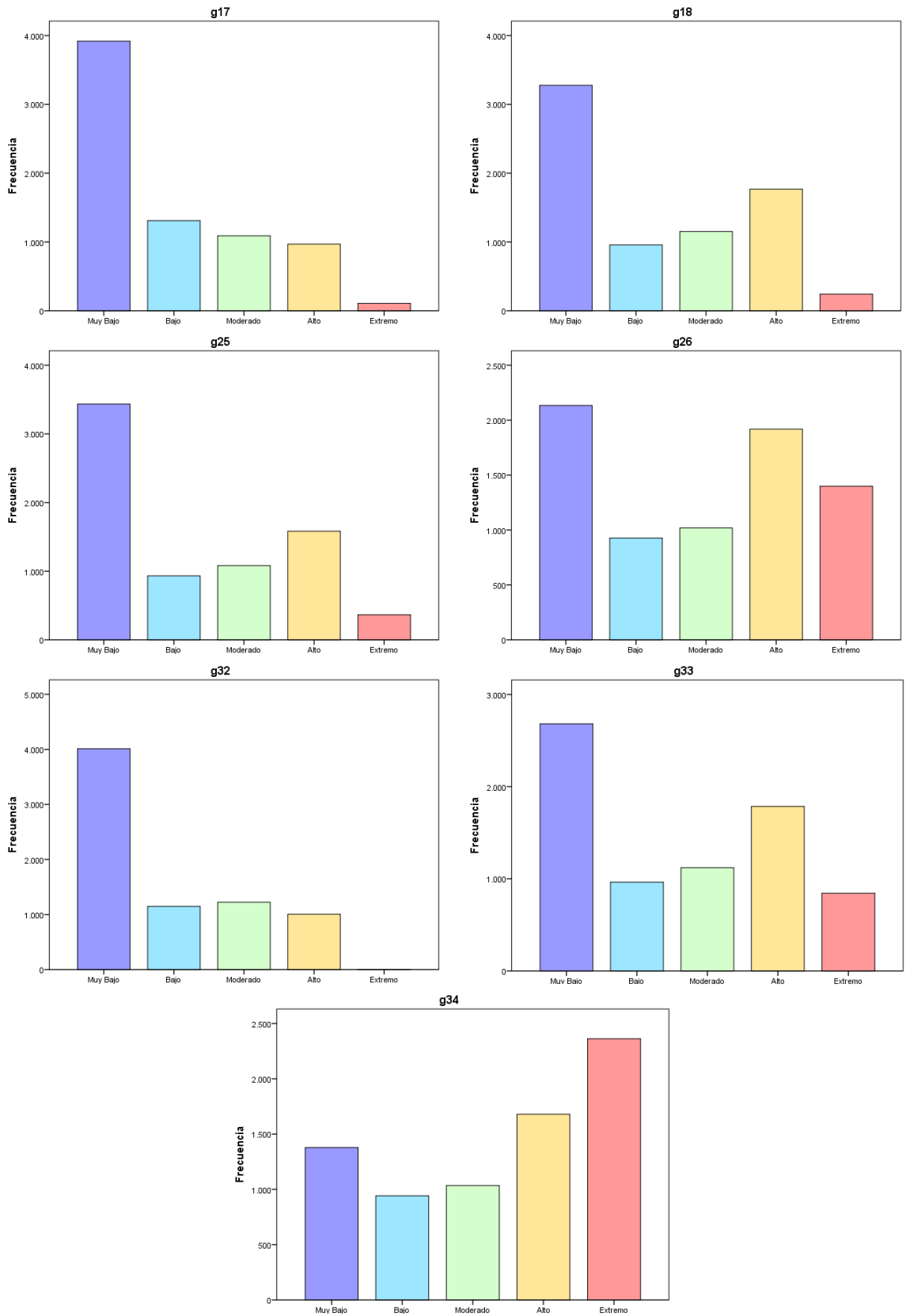


Figura 34: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Serie”.

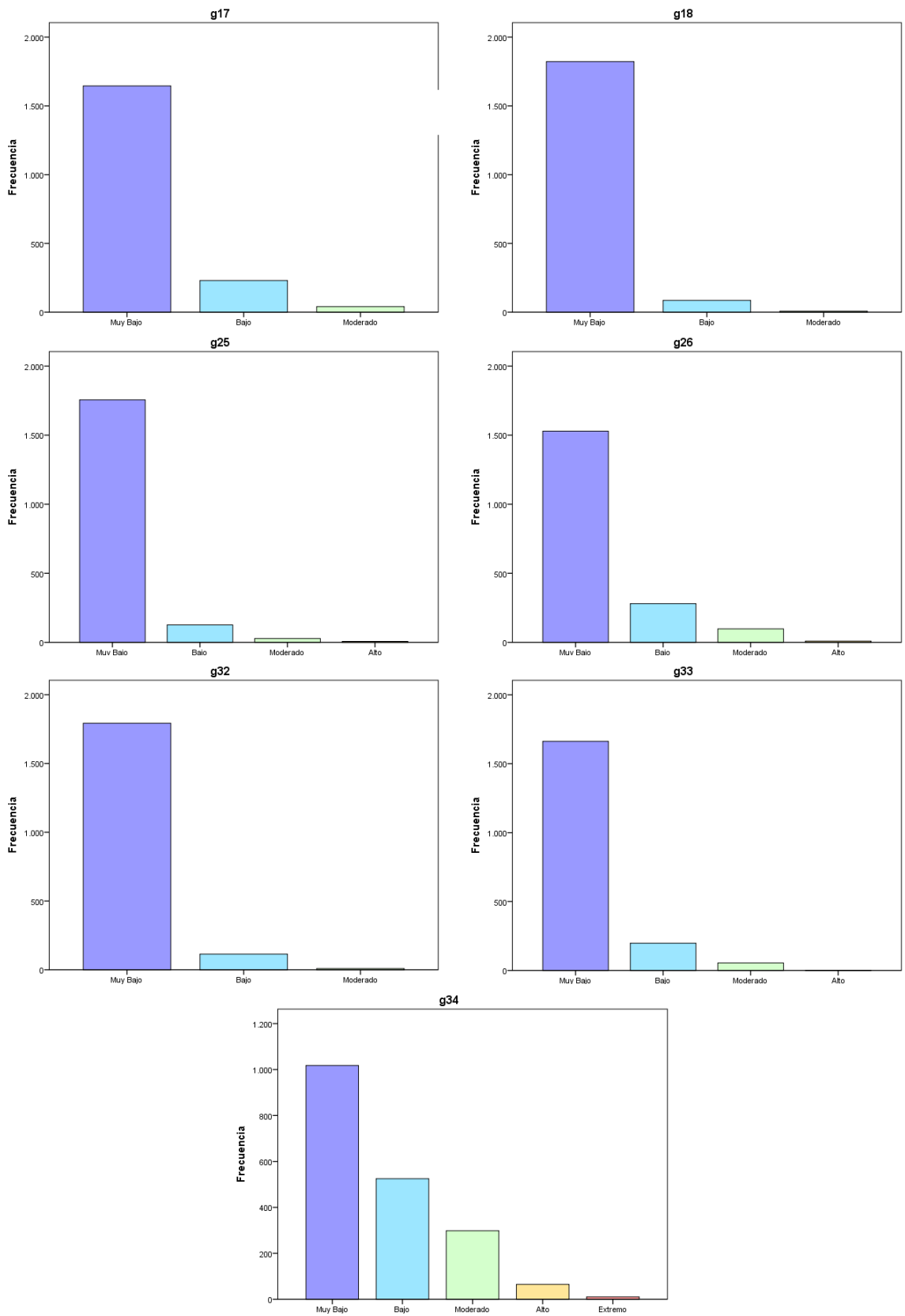


Figura 35: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Verano”.

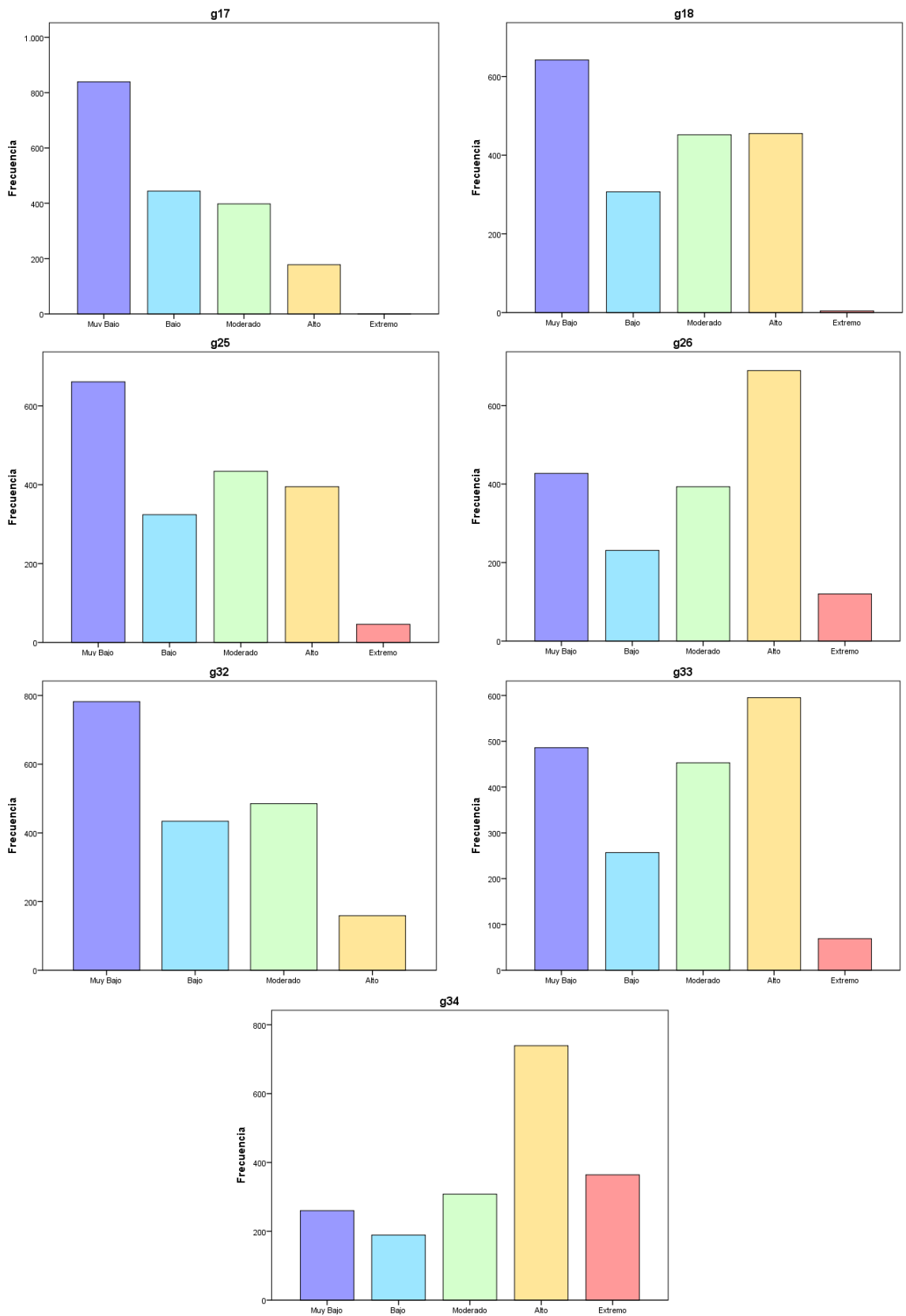


Figura 36: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Otoño”.

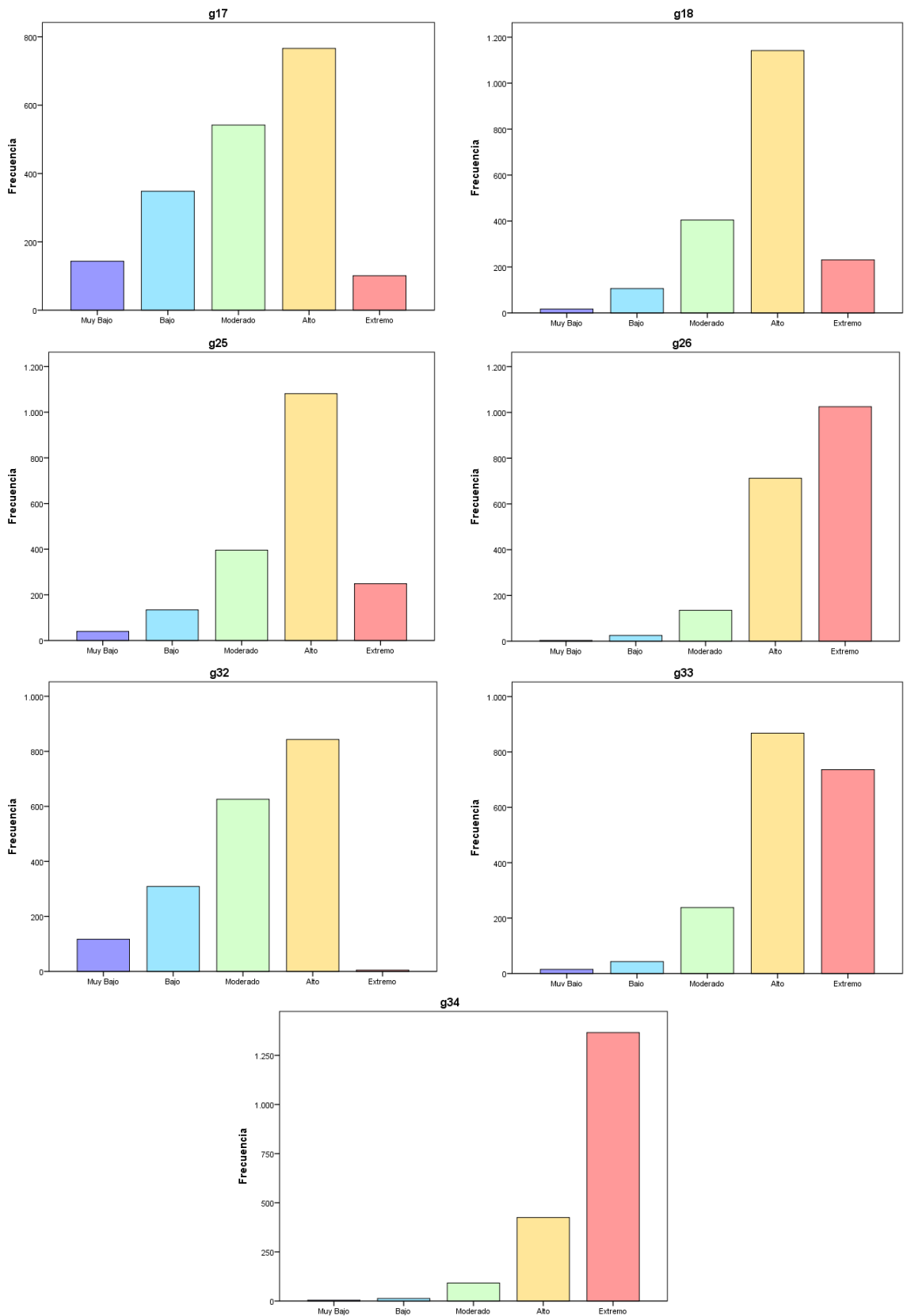


Figura 37: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Invierno”.

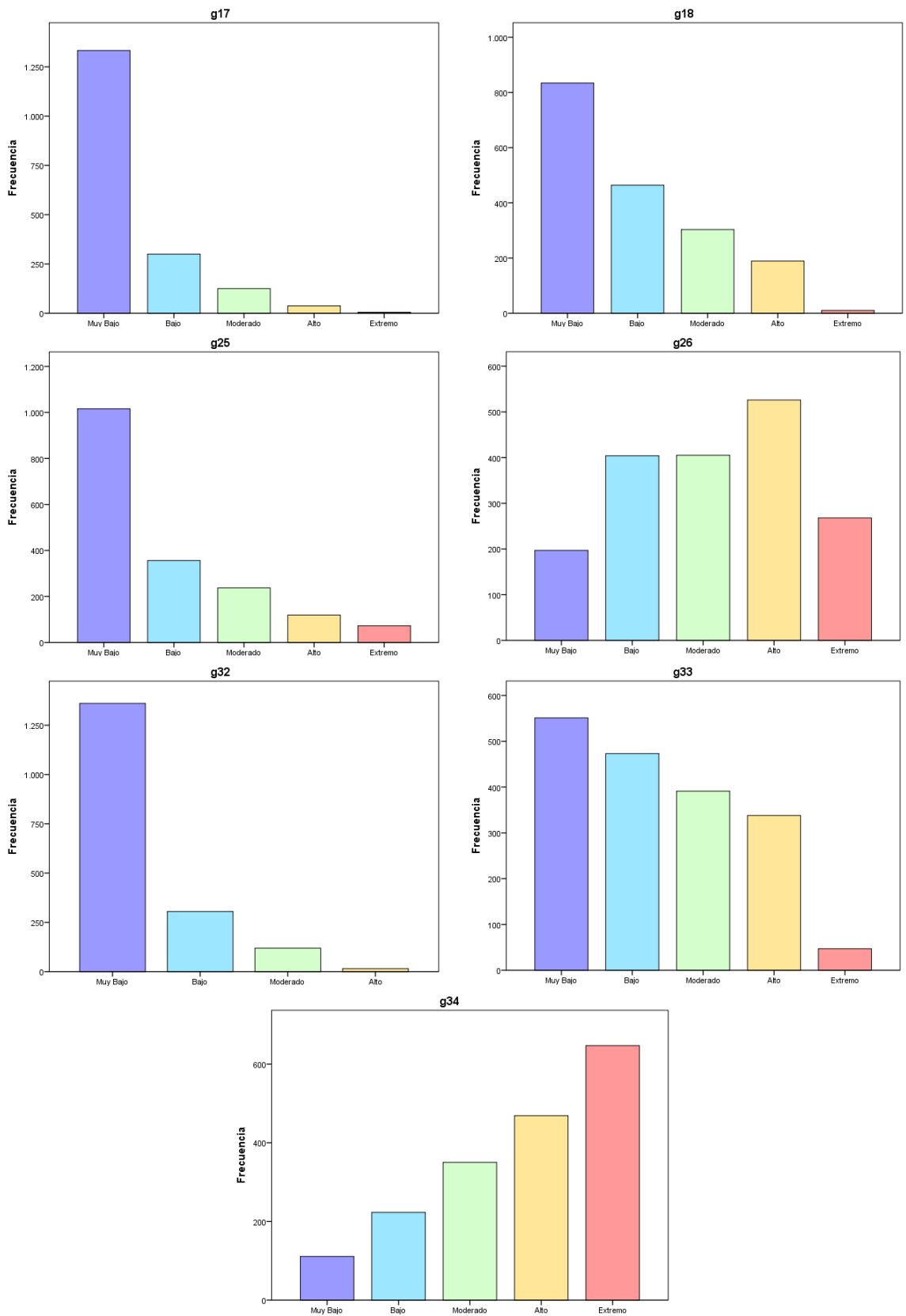


Figura 38: Distribución de las frecuencias absolutas del total de valores diarios del “FWI”, según el cuadrante estudiado para la línea de tiempo “Primavera”.

Los histogramas representan gráficamente la distribución de frecuencias absolutas de la variable "FWI" registradas para cada línea temporal en forma de barras. La información está dividida en intervalos de clases: "Muy Baio", "Bajo", "Moderado", "Alto" y "Extremo". Cada rectángulo representa el número de frecuencia que se encuentran dentro de ese intervalo particular de clase.

Se forman cinco pruebas de tiempo ("Serie", "Verano", "Otoño", "Invierno" y "Primavera") para cada una de las siete grillas representativas para el departamento de Cusco, siendo estas: "g17", "g18", "g25", "g26", "g32", "g33" y "g34".

La lista de histogramas de la línea "Serie" engloba la totalidad de los datos diarios registrados desde el 21/12/94 al 21/03/2015. Seis de las siete grillas evaluadas reconoce a la categoría "Muy Bajo" como predominante y "Extremo" como más escaso.

Se presenta a continuación un análisis estadístico de los resultados por grillas.

- "g17"

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 52,99% de estos estarían clasificados como "Muy Bajo", seguido de forma descendente por una media de 15,19% en las categorías de "Bajo", "Moderado" Y "Alto", solo el 1,45% de estos son clasificados como "Extremo".

- "g18"

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 44,31% de estos estarían clasificados como "Muy Bajo", a diferencia del cuadrante anterior se observa una ligera tendencia de incremento (12,59%, 15,58% y 23,9%) en las tres categorías posteriores y un registro un poco más del doble de valores "Extremos".

- "g25"

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 46,44% de estos estarían clasificados como "Muy Bajo", se sigue la tendencia de aumento (12,59%, 14,63% y 21,4%) y se triplica el valor inicial de valores "Extremos".

- "g26"

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 28,85% de estos estarían clasificados como "Muy Bajo", con un incremento sustancial de las categorías posteriores (12,53%, 13,78%, 25,93% y 18,9%) reconociendo sustancialmente el crecimiento de la categoría "Extremo", una frecuencia observada de 1 398 incidencias registradas lo sitúa en el segundo lugar dentro del recuento de la casilla.

- “g32”

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 54,25% de estos estarían clasificados como “Muy Bajo”, siendo el cuadrante con mayor porcentaje de esta categoría, las tres categorías siguientes están bajo una media compartida de 15,23% y la categoría “Extremo” solo se contabilizó cinco veces, lo que es traducido en menos del 1% de los datos registrados.

- “g33”

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 36,26% de estos estarían clasificados como “Muy Bajo”, se vuelve a manifestar el incremento de las categorías superiores (13,03%, 15,16%, 24,15% y 11,4%) teniendo también un recuento significativo de eventos clasificados como "Extremo" como en “g26”.

- “g34”

Para los valores totales (7 396 días) se reconoció que el 18,63% de estos estarían clasificados como "Muy Bajo", siendo el porcentaje más bajo registrado en los siete cuadrantes evaluados (18,63%). Las categorías "Bajo", "Moderado" y "Alto" presentan un 12,74%, 13,98% y 22,71% del total. En este mismo cuadrante también se concentra el porcentaje más elevado de las líneas de tiempo, la categoría "Extremo" representa el 31,94% del total de días de estudio.

Los histogramas más representativos para el análisis de la variación del "FWI" son las épocas de verano e invierno, ya que estas representan condiciones climatológicas marcadas a diferencia de las temporadas de otoño y primavera que son de transición climatológica.

Dentro de la estación de verano se va a concentrar el mayor porcentaje de registros definidos como "Muy Bajo" se puede hablar de un 41,97% ("g17"), 55,6% ("g18"), 51,09% ("g25"), 71,65% ("g26"), 44,69% ("g32"), 61,97% ("g32") y 73,88% ("g34") de representación para cada una de las grillas establecidas. De esta forma se establece el predominio de la categoría para verano dejando a las demás categorías muy rezagadas, solo en el caso de "g34" la sumatoria de estas últimas ("Bajo" (27,4%), "Moderado" (15,55%), "Alto" (3,55%) y "Extremo" (0,37%)) logra acercarse con un 46,87% al 53,13% de los casos registrados como "Muy Bajo", esto no vuelve a repetirse en ninguna de las demás casillas.

En el invierno se observa que en todos los cuadrantes se da una participación mayoritaria para las categorías "Alto" y "Extremo" tornándose significativos en función del resto. Tomando como referencia la serie total y comparándola con cada uno de los casos de invierno se tiene que los valores "Altos" son: 79,05% ("g17"), 64,59% ("g18"), 68,28% ("g25"), 37,12% ("g26"), 83,79% ("g32"), 48,60% ("g33") y 25,29% ("g34"); mientras que los registros de "Extremos" llegan a ser: 94,39% ("g17"), 95,45% ("g18"), 68,21% ("g25"), 73,31% ("g26"), 100% ("g32"), 87,3% ("g33") y 57,83% ("g34").

Las temporadas de "Otoño" y "Primavera" vienen a ser épocas de transición, por lo que no establecen una distribución referencial. Su evaluación debe tomarse con mucho cuidado ya que los categóricos marginales más representativos que son "Muy Bajo" y "Extremo" son registrados en días cercanos a los límites entre estaciones.

Tabla 10: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Serie”. FA=Frecuencia absoluta; Fr=Frecuencia relativa.

Categoría	Cuadrante 17		Cuadrante 18		Cuadrante 25		Cuadrante 26	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	3 919	52,99	3 277	44,31	3 435	46,44	2 134	28,85
Bajo	1 311	17,73	957	12,94	931	12,59	927	12,53
Moderado	1 090	14,74	1 152	15,58	1 082	14,63	1 019	13,78
Alto	969	13,10	1 768	23,90	1 583	21,40	1 918	25,93
Extremo	107	1,45	242	3,27	365	4,94	1 398	18,90

Categoría	Cuadrante 32		Cuadrante 33		Cuadrante 34	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	4 012	54,25	2 682	36,26	1 378	18,63
Bajo	1 149	15,54	964	13,03	942	12,74
Moderado	1 224	16,55	1 121	15,16	1 034	13,98
Alto	1 006	13,60	1 786	24,15	1 680	22,71
Extremo	5	0,07	843	11,40	2 362	31,94

Tabla 11: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Verano”. FA=Frecuencia absoluta; Fr=Frecuencia relativa.

Categoría	Cuadrante 17		Cuadrante 18		Cuadrante 25		Cuadrante 26	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	1 645	85,86	1 822	95,09	1755	91,60	1529	79,80
Bajo	230	12,00	86	4,49	126	6,58	280	14,61
Moderado	41	2,14	8	0,42	28	1,46	98	5,11
Alto					7	0,37	9	0,47
Extremo								

Categoría	Cuadrante 32		Cuadrante 33		Cuadrante 34	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	1 793	93,58	1 662	86,74	1 018	53,13
Bajo	114	5,95	198	10,33	525	27,40
Moderado	9	0,47	55	2,87	298	15,55
Alto			1	0,05	68	3,55
Extremo					7	0,37

Tabla 12: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Otoño”. FA=Frecuencia absoluta; Fr=Frecuencia relativa.

Categoría	Cuadrante 17		Cuadrante 18		Cuadrante 25		Cuadrante 26	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	839	45,11	642	34,52	661	35,54	427	22,96
Bajo	444	23,87	307	16,51	324	17,42	231	12,42
Moderado	398	21,40	452	24,30	434	23,33	393	21,13
Alto	178	9,57	455	24,46	395	21,24	689	37,04
Extremo	1	0,05	4	0,22	46	2,47	120	6,45

Categoría	Cuadrante 32		Cuadrante 33		Cuadrante 34	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	782	42,04	486	26,13	260	13,98
Bajo	434	23,33	257	13,82	189	10,16
Moderado	485	26,08	453	24,35	308	16,56
Alto	159	8,55	595	31,99	739	39,73
Extremo			69	3,71	364	19,57

Tabla 13: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Invierno”. FA=Frecuencia absoluta; Fr=Frecuencia relativa.

Categoría	Cuadrante 17		Cuadrante 18		Cuadrante 25		Cuadrante 26	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	143	7,53	17	0,89	40	2,11	3	0,16
Bajo	348	18,32	106	5,58	134	7,05	25	1,32
Moderado	542	28,53	404	21,26	396	20,84	135	7,11
Alto	766	40,32	1 142	60,11	1 081	56,89	712	37,47
Extremo	101	5,32	231	12,16	249	13,11	1025	53,95

Categoría	Cuadrante 32		Cuadrante 33		Cuadrante 34	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	117	6,16	15	0,79	4	0,21
Bajo	309	16,26	43	2,26	13	0,68
Moderado	626	32,95	238	12,53	92	4,84
Alto	843	44,37	868	45,68	425	22,37
Extremo	5	0,26	736	38,74	1366	71,89

Tabla 14: Valores de frecuencias absolutas del “FWI” asociados a las categorías de peligro por cuadrantes dentro del periodo de prueba diario para línea de tiempo “Primavera”. FA=Frecuencia absoluta; Fr=Frecuencia relativa.

Categoría	Cuadrante 17		Cuadrante 18		Cuadrante 25		Cuadrante 26	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	1 333	74,06	834	46,33	1016	56,44	197	10,94
Bajo	300	16,67	464	25,78	356	19,78	404	22,44
Moderado	125	6,94	303	16,83	237	13,17	405	22,50
Alto	37	2,06	189	10,50	119	6,61	526	29,22
Extremo	5	0,28	10	0,56	72	4,00	268	14,89

Categoría	Cuadrante 32		Cuadrante 33		Cuadrante 34	
	FA	FR	FA	FR	FA	FR
Muy Bajo	1 361	75,61	551	30,61	111	6,17
Bajo	305	16,94	473	26,28	223	12,39
Moderado	119	6,61	391	21,72	350	19,44
Alto	15	0,83	338	18,78	469	26,06
Extremo			47	2,61	647	35,94

4.11 Análisis geoespacial de los incendios forestales dentro de Cusco

En base a los datos obtenidos de la recopilación de información referente a los incendios forestales producidos en el departamento de Cusco (1995 - 2014) se tiene un récord de 252 eventos, a los cuales se les va a georreferenciar según el distrito donde se presentó el siniestro.

Aplicando la técnica de densidad simple de puntos con ArcGis se puede asignar el número de incendios por área definida, como resultado se tiene un conjunto de circunferencias con tres tonalidades que expresan el grado de concentración. Empezando con el color verde como nivel más bajo, seguido del amarillo como moderado y finalizando con rojo que establece un alto nivel de concentración. Y si a estos mismos puntos se les realiza una asignación de categóricos según el “Fire Weather Index” se obtendría un mapa de intensidad de fuego que visualmente podría reconocerse por cinco coloraciones representativas de cada nivel de la escala.

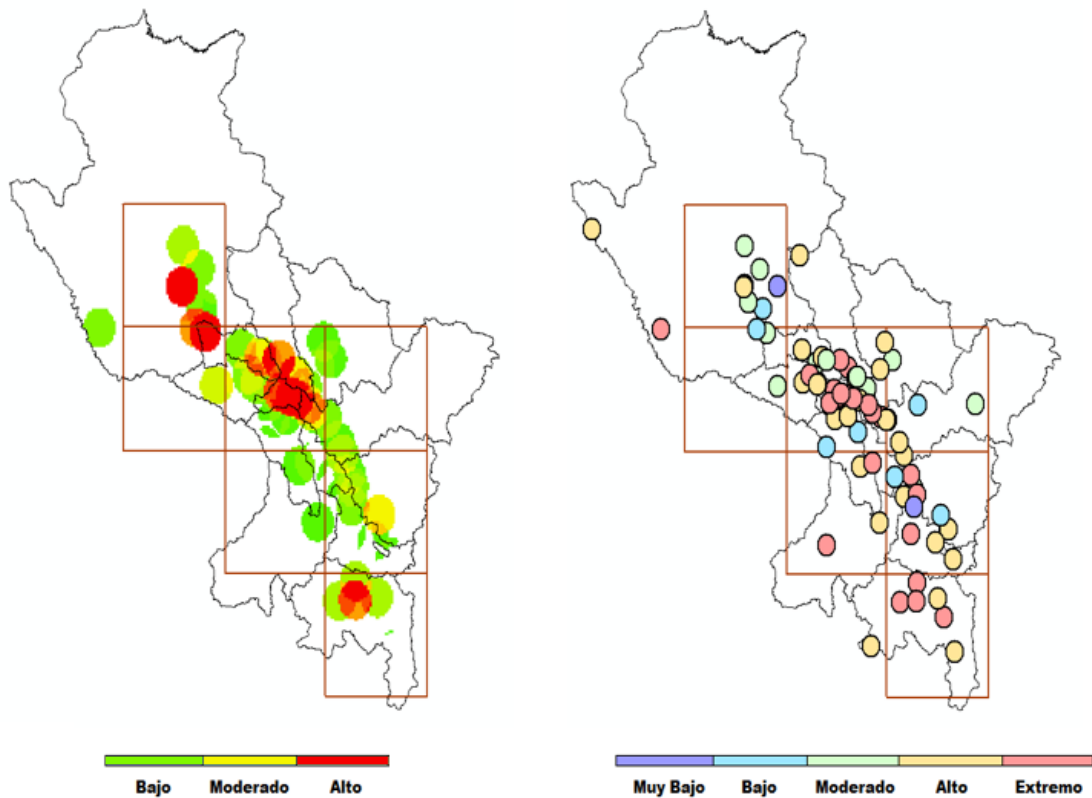


Figura 39: Mapas de densidad (Izquierda) e intensidad (Derecha) de incendios forestales en el departamento de Cusco. Delimitación con márgenes de las 7 cuadrículas definidas para el estudio.

Al comparar los dos mapas (Figura 39) se puede reconocer información importantísima sobre la georreferenciación de los incendios forestales. Existen tres focos principales donde se concentran la mayor cantidad de eventos por espacio geográfico, estos están ubicados en los cuadrantes: “g17”, “g25” y “g34”; haciendo mención que son representativos de los climas encontrados en Cusco (Selva norte, Sierra central y Sierra sur).

En la zona central se concentra la mayor cantidad de incendios forestales para el departamento de Cusco, así mismo puede encontrarse los diferentes niveles de peligrosidad del “FWI”, cabe mencionar que sobresale un mayor número de eventos catalogados por encima del categórico “Moderado”.

Para la zona sur se registra el segundo foco en importancia de incendios forestales, con altos niveles de peligrosidad. Entre la parte central y sur existe un cuadrante intermedio (g33) que reporta niveles moderados-bajos de incidencias, tener en consideración esta área en el monitoreo de incendios.

El último foco detectable se da al norte, concentra una gran cantidad de incendios que están clasificados por debajo del categórico “Moderado”. El registro evidencia que se producen, pero son de baja peligrosidad debido al clima de selva (lluvioso y húmedo) el cual evitaría que los combustibles se sequen con facilidad.

4.12 Medidas estadísticas del “FWI”

Desarrollada la categorización del “FWI” se trabaja con los resultados obtenidos de tablas de frecuencias para cada una de las siete grillas evaluadas en los cinco periodos de tiempo.

Las medidas estadísticas encontradas van a reforzar los criterios de evaluación sobre la distribución de los valores, así como servir de herramienta matemática para identificar características netas en cada grilla.

El enfoque se dará especialmente para las temporadas de "Verano" e "Invierno", los contrastes existentes revelarán las características más importantes para la investigación del índice. Las medidas de tendencia central son empleadas para expresar de manera resumida a un conjunto de datos en un solo valor numérico que encuentra representatividad en los valores intermedios, para las dos temporadas se tiene que las mínimas reportadas son cercanas a cero mientras que los máximos alcanzados son diferentes, dándose casos en donde por lo menos se ha duplicado el umbral del máximo por grilla. Esta ampliación del rango hace que se cuente con un mayor número de categorías, claramente evidenciada en los histogramas de frecuencias. La media y mediana en el verano rodea los valores cercanos a cero y en solo dos casos supera la unidad; en cambio en invierno estas medidas estadísticas se ubican por lo menos por encima de la mitad del máximo registrado en cada grilla.

La moda que es el valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos es la medida más diferenciadora existente entre estas dos temporadas, ya que en el verano los valores reiterativos coinciden en mayoría con los reportes de las mínimas registradas, en cambio en el invierno no se presenta esta tendencia sino más bien se acomodan más cerca a la media y mediana.

Por último, al realizar un análisis comparativo de varianzas entre los dos casos se evidencia el menor grado de dispersión de la primera frente a la segunda en todas las casillas.

Tabla 15: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Serie"

Cuadrante	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza
G17	0,00	33,23	4,72	0,99	0,00	6,56	43,06
G18	0,00	32,51	7,17	3,07	0,01	8,24	67,88
G25	0,00	89,03	7,51	2,53	0,00	10,25	105,11
G26	0,00	56,30	12,45	9,66	0,01	11,66	136,02
G32	0,00	25,56	4,42	0,85	0,00	5,85	34,27
G33	0,00	53,46	9,73	5,76	0,00	10,35	107,03
G34	0,00	92,90	17,16	15,33	0,01	14,67	215,22

Tabla 16: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Verano"

Cuadrante	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza
G17	0,00	10,92	0,82	0,37	0,00	1,35	1,81
G18	0,00	7,37	0,40	0,21	0,00	0,72	0,52
G25	0,00	19,89	0,63	0,24	0,00	1,55	2,39
G26	0,00	22,31	1,22	0,40	0,01	2,21	4,88
G32	0,00	7,75	0,46	0,25	0,00	0,81	0,66
G33	0,00	13,06	0,77	0,26	0,01	1,50	2,26
G34	0,00	37,96	3,10	1,08	0,01	4,26	18,19

Tabla 17: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Otoño"

Cuadrante	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza
G17	0,00	25,07	4,35	2,17	0,01	5,03	25,33
G18	0,00	26,87	7,01	5,26	0,03	6,63	43,89
G25	0,00	39,40	7,08	4,70	0,01	7,35	54,07
G26	0,00	34,24	10,89	10,67	0,08	8,59	73,79
G32	0,00	20,09	4,49	2,73	0,03	4,69	22,00
G33	0,00	31,99	9,31	8,40	0,02	7,80	60,83
G34	0,00	50,38	15,14	15,43	0,99	10,28	105,75

Tabla 18: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Invierno"

Cuadrante	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza
G17	0,00	33,23	11,83	11,31	10,10	7,58	57,43
G18	0,02	32,51	16,81	17,99	16,76	6,88	47,34
G25	0,00	89,03	17,15	17,04	10,15	10,10	101,93
G26	0,24	56,30	25,09	25,27	25,54	8,59	73,80
G32	0,00	25,56	11,14	11,37	15,96	6,06	36,68
G33	0,10	53,46	21,81	22,48	19,77	8,53	72,84
G34	0,26	92,90	30,90	30,60	22,98	11,65	135,79

Tabla 19: Medidas Estadísticas de centralización y dispersión del FWI en la línea "Primavera"

Cuadrante	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza
G17	0,00	26,86	1,77	0,45	0,01	3,39	11,48
G18	0,00	30,38	4,38	1,90	0,01	5,60	31,40
G25	0,00	83,23	5,10	0,85	0,00	10,85	117,65
G26	0,01	50,77	12,63	10,20	0,48	9,98	99,56
G32	0,00	21,00	1,46	0,40	0,00	2,63	6,92
G33	0,00	39,97	6,91	4,31	0,00	7,35	53,99
G34	0,01	83,67	19,69	18,20	1,93	14,17	200,74

Un análisis en las medidas de asimetría y curtosis permiten determinar y validar la forma de distribución para conjunto de datos. Se reconoce estadísticamente la marcada tendencia de valores a desarrollarse, acumularse y concentrarse al margen izquierdo en verano; mientras que en invierno hay una respuesta contraria situándose los casos ahora en el margen derecho.

Tabla 20: Medidas de distribución del FWI en la línea "Serie"

Distribución		Asimetría	Curtosis
Cuadrante	G17	1,609	1,763
	G18	0,904	-0,522
	G25	2,362	9,277
	G26	0,611	-0,705
	G32	1,314	0,566
	G33	0,863	-0,307
	G34	0,673	-0,106

Tabla 21: Medidas de distribución del FWI en la línea "Verano"

Distribución		Asimetría	Curtosis
Cuadrante	G17	3,18	12,05
	G18	4,93	30,97
	G25	6,65	58,34
	G26	3,63	18,56
	G32	4,38	24,05
	G33	3,51	14,31
	G34	2,70	10,64

Tabla 22: Medidas de distribución del FWI en la línea "Otoño"

Distribución		Asimetría	Curtosis
Cuadrante	G17	1,34	1,19
	G18	0,63	-0,84
	G25	1,15	1,16
	G26	0,30	-1,04
	G32	0,93	-0,23
	G33	0,45	-0,91
	G34	0,22	-0,73

Tabla 23: Medidas de distribución del FWI en la línea "Invierno"

Distribución		Asimetría	Curtosis
Cuadrante	G17	0.30	-0.88
	G18	-0.36	-0.76
	G25	2.06	9.82
	G26	-0.06	0.20
	G32	-0.04	-1.04
	G33	-0.10	-0.09
	G34	0.44	1.24

Tabla 24: Medidas de distribución del FWI en la línea "Primavera"

Distribución		Asimetría	Curtosis
Cuadrante	G17	3.37	13.72
	G18	1.67	2.29
	G25	4.12	19.56
	G26	0.71	-0.31
	G32	3.05	11.15
	G33	1.29	1.16
	G34	0.65	0.02

Se recurre al percentil 95 como medida de posición ya que una vez ordenados los datos de menor a mayor se puede establecer un límite de criterio fijo para una variable. Es decir que el 95% de los valores se concentraran por igual o por debajo del percentil y el 5% se sitúa por encima. De esta forma se puede reconocer la predominancia de valores bajos en verano; ya que sus percentiles presentan un tope estadístico debajo de lo normal según el criterio de los categóricos del "FWI" que de su par en invierno.

Tabla 25: Estadístico de posición percentil 95.

Percentil 95	g17	g18	g25	g26	g32	g33	g34
Verano	3,69	1,45	2,92	5,88	1,93	4,10	11,53
Otoño	14,61	19,20	20,08	25,56	13,53	23,22	32,10
Invierno	24,68	26,51	30,21	39,04	20,50	35,47	50,17
Primavera	9,11	16,75	21,24	30,69	7,24	22,06	44,40

4.13 PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Tabla 26: Resumen de contrastes prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de g17 es normal con la media 4,72 y la desviación estándar 6,562.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.
2	La distribución de g18 es normal con la media 7,17 y la desviación estándar 8,239.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.
3	La distribución de g25 es normal con la media 7,51 y la desviación estándar 10,252.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.
4	La distribución de g26 es normal con la media 12,45 y la desviación estándar 11,663.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.
5	La distribución de g32 es normal con la media 4,42 y la desviación estándar 5,854.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.
6	La distribución de g33 es normal con la media 9,73 y la desviación estándar 10,346.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.
7	La distribución de g34 es normal con la media 17,16 y la desviación estándar 14,670.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,000 ¹	Rechace la hipótesis nula.

Se desarrollaron 7 pruebas estadísticas de kolmogorov-Smirnov una para cada cuadrante, la hipótesis nula enuncia la distribución normal de las frecuencias y al 95% de significancia se obtiene que para todos los casos los P-Valores son menores al 0,05. Por ende, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna. La variable "Fire Weather Index" no posee una distribución normal en el tiempo en cualquier punto de las grillas evaluadas". A si mismo se desprende que no son aplicables más pruebas de tipo paramétricas a la serie de datos; por lo que se recurrirá a categorizar los valores de la variable y desarrollar pruebas no paramétricas.

4.14 Prueba de Chi cuadrado

Tabla 27: Resumen de contrastes prueba de Chi-Cuadrado

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las categorías de g17_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.
2	Las categorías de g18_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.
3	Las categorías de g25_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.
4	Las categorías de g26_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.
5	Las categorías de g32_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.
6	Las categorías de g33_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.
7	Las categorías de g34_Catg se producen con probabilidades de igualdad.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	,000	Rechace la hipótesis nula.

La prueba estadística de chi cuadrado demuestra que los valores categóricos: "Muy Bajo", "Bajo", "Moderado", "Alto" y "Extremo" no siguen una distribución constante y uniforme en el transcurso del año. De hecho, en lo histogramas, visualmente se podía reconocer la inclinación de categóricos en base a la estacionalidad, lo cual refleja que la variable "FWI" responde a un cambio a partir de condiciones meteorológicas.

4.15 Tabla de contingencia

Tabla 28: Distribución de frecuencias categóricas del “FWI” para los días donde se registró incendio.

Nivel	Número de incendios							Total
	g17	g18	g25	g26	g32	g33	g34	
Muy Bajo	9	1	4	0	0	1	0	15
Bajo	11	1	13	0	3	2	0	30
Moderado	22	4	20	0	1	1	0	48
Alto	29	1	45	3	4	9	5	96
Extremo	2	1	23	3	0	9	25	63
Total	73	8	105	6	8	22	30	252

Los siete cuadrantes evaluados presentan una distribución diferencial de las categorías asignadas del “FWI” con relación a los incendios registrados dentro de cada grilla; esta respuesta se da más influenciada por la ubicación geográfica de las cuadrículas que del número de incidencias. Considerando al departamento de Cusco con dos zonas climáticas altamente marcadas y una intermedia (Anexo 10).

Dentro de la temporada de incendios se reconoce que en los cuadrantes del norte (“g17” y “g18”) con mayor tasa de precipitación y humedad registran más de la mitad de los incidentes de “Moderado” para abajo; los cuadrantes del centro (“g25” y “g32”) concentran más de la mitad de sus eventos entre las categorías “Moderado” y “Alto”; por último los cuadrantes del sur (“g26”, “g33” y “g34”) condicionados a un clima seco responden significativamente a las categorías “Alto” y “Extremo” con un porcentaje de atención mayor al 80%.

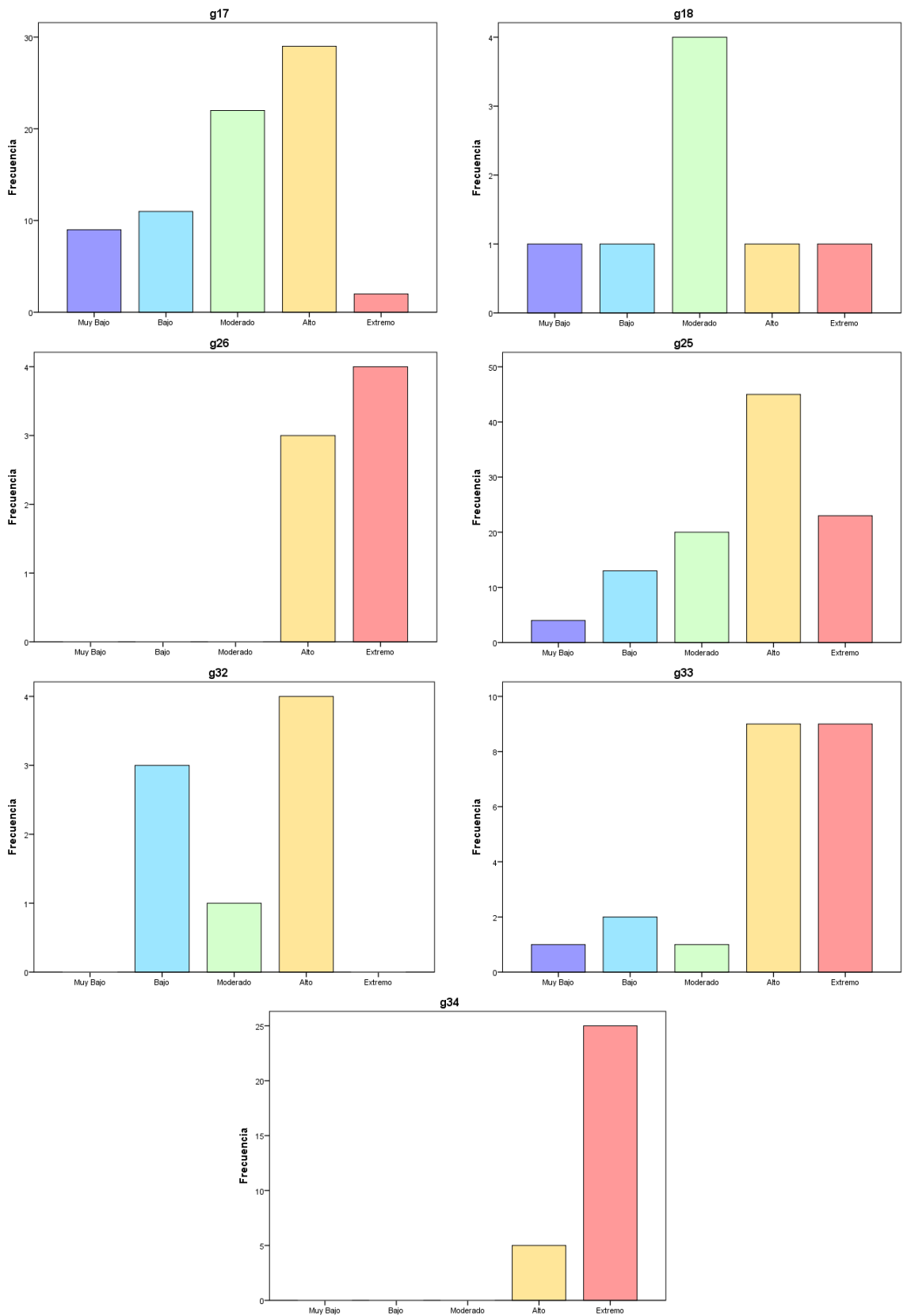


Figura 40: Distribución de las frecuencias absolutas de incendios forestales categorizados según el cuadrante estudiado y entre los meses con registro.

4.16 Análisis Climatológico

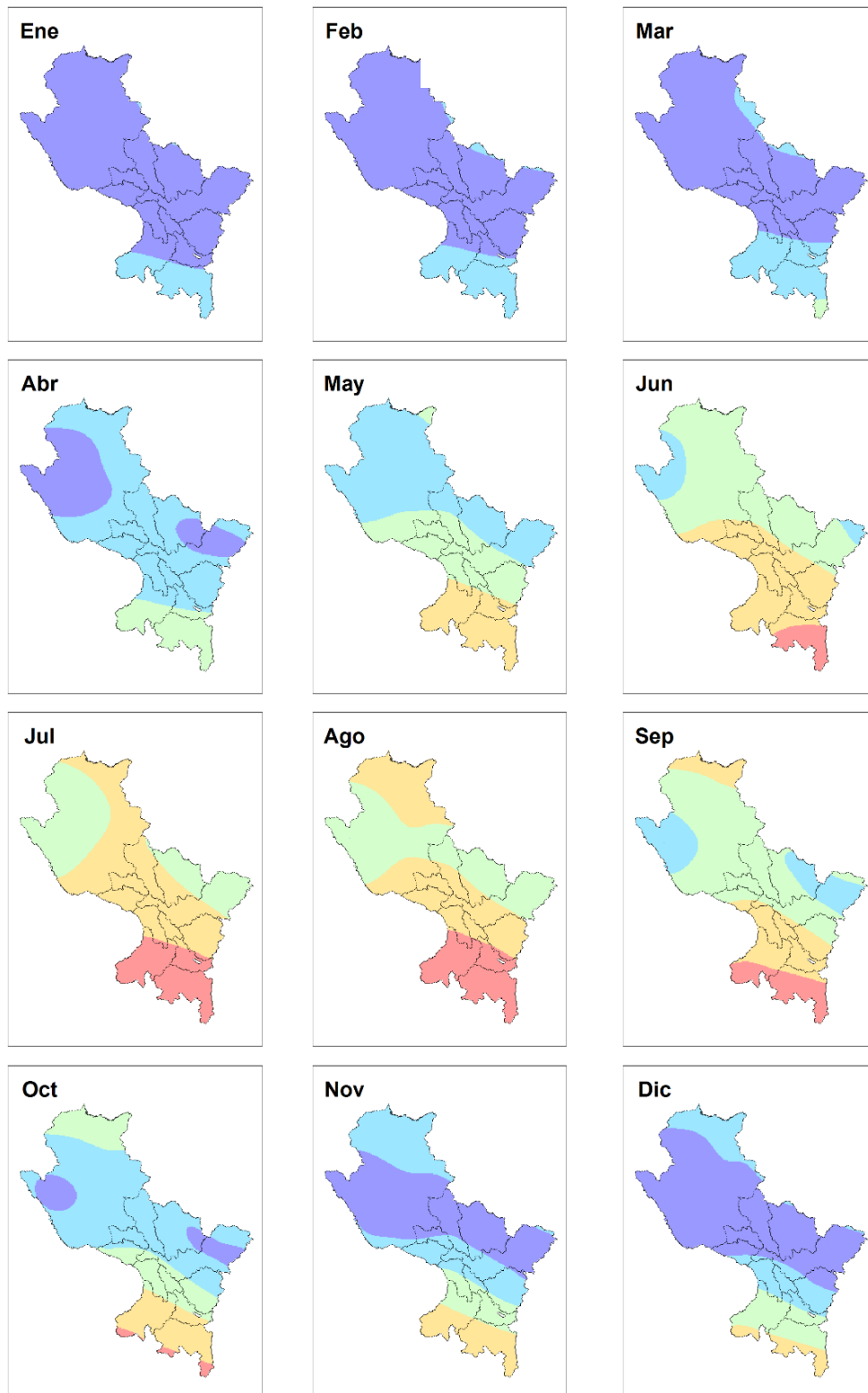


Figura 41. Análisis multianual de valores promedios mensuales del “FWI” para todas las grillas analizadas desde 1979 al 2015 empleando como datos meteorológicos los resultados del ERA-Interim en superficie.

A partir de los datos diarios categorizados de la serie de tiempo total (1979-2015) en las 42 cuadrículas descargadas del ERA-Interim se establece un análisis multianual donde se reconoce la media representativa para cada mes, de esta forma se forman 12 mapas secuenciales donde se evidencia visualmente la distribución y predominancia de las categorías dentro de los límites cusqueños.

En el primer trimestre del año se tiene un bajo nivel del índice, gran porcentaje del territorio en el norte y centro se caracterizan por la categoría "Muy Bajo" mientras que en la región sur se va expandiéndose lentamente con el categórico "Bajo". La explicación de esta predominancia por valores bajos es la temporada de verano.

Los sistemas meteorológicos de gran escala condicionan esta temporalidad en donde la migración de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) buscando más energía en el hemisferio sur y el desplazamiento austral del anticiclón del pacífico sur ocasiona que el ciclo hidrológico se haga más marcado en estos meses provocando de esta forma la humectación de los combustibles dejando poca probabilidad de ignición u expansión del fuego.

El segundo trimestre se acomoda a una de las dos temporadas intermedias del año. Otoño se ve marcado en los meses de Abril, Mayo y Junio donde la escala del registro aumenta en relación de la temporada anterior; ahora puede identificarse rangos del índice como "Moderado", "Alto" y hasta "Extremo" para una pequeña parte del último mes de esta serie. El incremento de los categóricos es desde el sur debido al alejamiento paulatino de la ZCIT dejando gradualmente la disminución de zonas con categorías bajas.

La tercera temporada del año es el invierno en donde los meses de Junio, Agosto y Setiembre son los más característicos. En los mapas se puede ver claramente como los valores "Moderado", "Alto" y "Extremo" son predominantes en las provincias cusqueñas lo que es altamente peligroso ya que según el índice estas serían las mejores condiciones meteorológicas para la ignición y expansión rápida de un incendio. Tales condiciones meteorológicas responden al cambio sinóptico en superficie y altura; la migración más al norte del ZCIT deja sin lluvias estos meses y la aparición de una corriente en chorro subtropical que intensifica la velocidad del viento y además trae consigo una extracción de humedad hace que los combustibles forestales se sequen rápidamente.

El último trimestre es la temporada de primavera, la segunda etapa de transición. La temporada de lluvia en Cusco vuelve a reanudarse a finales de Setiembre (existiendo dos focos convectivos importantes en la selva cusqueña) creciendo gradualmente hasta intensificarse en verano. Como es una época de transición aún se perciben valores moderados y altos pero cada vez que nos acercamos a Diciembre el mapa se ajusta a condiciones bajas.

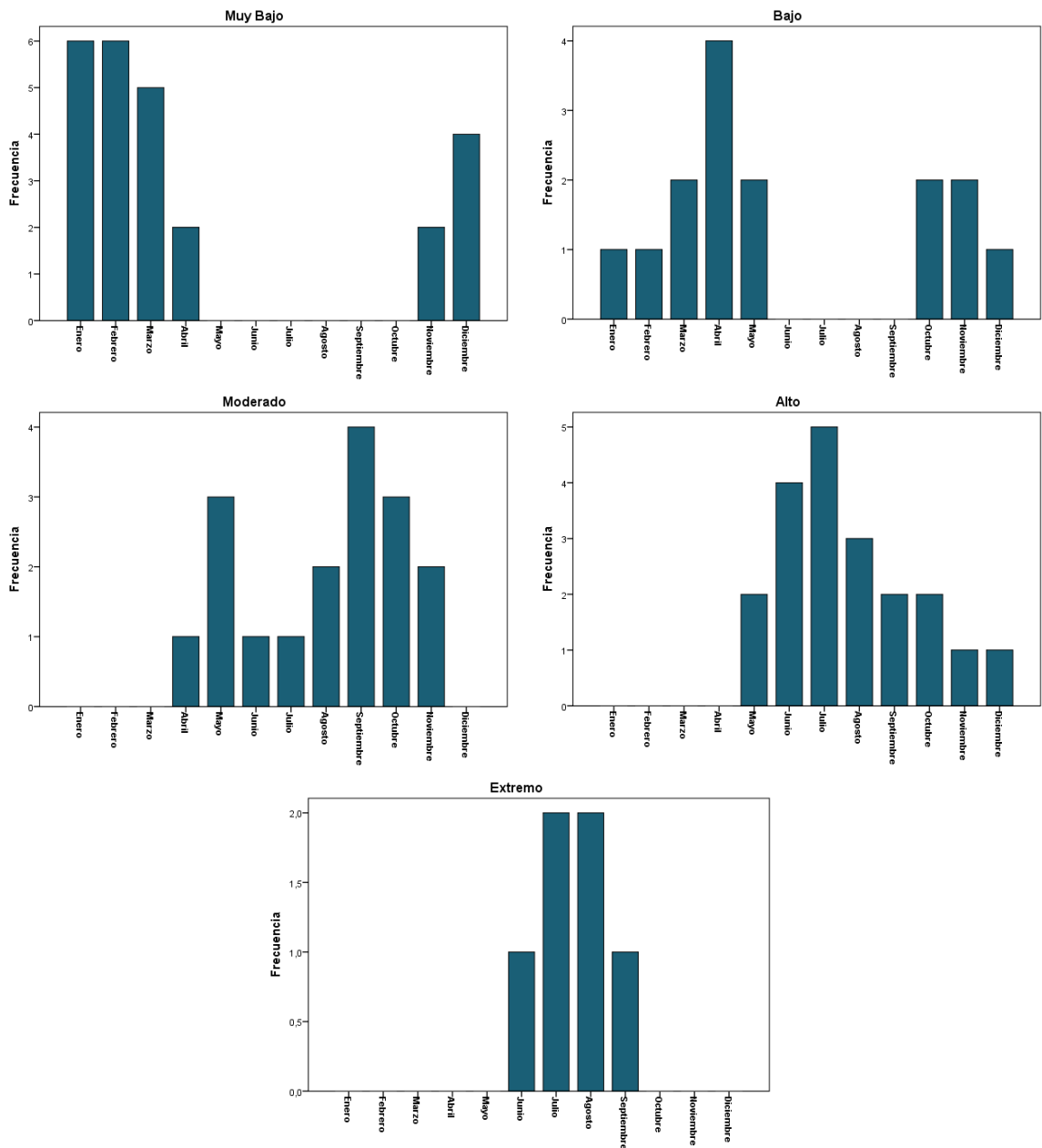


Figura 42. Distribución de las frecuencias absolutas categorizadas a partir del promedio mensual del “FWI” de las 7 grillas representativas de Cusco dentro del periodo de estudio 1979-2015.

En la figura 42 se ha trabajado con los 37 años de re-análisis meteorológico del ERA-Interim. Se evaluó a los siete cuadrantes más significativos (“g17”, “g18”, “g25”, “g32”, “g33” y “g34”) que representen al departamento de Cusco para establecer un criterio climatológico del índice. Se generó un promedio mensual a partir de las siete cuadrículas del "Fire Weather Index" dentro de este intervalo de tiempo. Cada resultado será categorizado en los niveles establecidos por el índice, de esta forma se puede obtener cuadros donde se pueda observar la frecuencia de aparición y magnitud de las categorías del índice en cada mes del año.

La categoría "Muy Bajo" está ausente entre los meses de Mayo a Octubre, en este tiempo predomina la categoría "Extremo" que a su vez condiciona a los valores positivos de los eventos clasificados como "Bajo"; de esta forma se marca la temporalidad de peligro de incendios forestales. Según estas estadísticas las condiciones meteorológicas hacen que sea mucho más probable el desarrollo de grandes incendios en los meses de Julio y Agosto que en los de Enero y Febrero.

Las condiciones de ‘Moderado’ parten del mes de Abril con pico en Setiembre y cierran valores para Noviembre, dejando poca probabilidad de ignición para los meses del verano austral. El categórico “Alto” es el que marca condiciones de peligro por encima de lo normal, las distribuciones de las frecuencias se asemejan a una asimetría positiva donde Julio es el mes de mayor valor.

V. CONCLUSIONES

De acuerdo con los objetivos planteados se concluye lo siguiente:

- 1) A partir de los datos meteorológicos en superficie extraídos del Era-Interim es posible desarrollar una sistematización del código "Fire Weather Index" (FWI) bajo una condición subtropical con contrastes climáticos bien definidos como es la sierra y selva Cusqueña. Como resultado se obtiene que las categorizaciones de los niveles del índice responden satisfactoriamente con los registros de incendios en la zona de estudio.
- 2) El estudio de incendios forestales reconoce siete zonas de desarrollo, delimitándose como cuadrículas que contienen registro de incendios por distritos. La mayor concentración de eventos se da en la grilla "g25", la cual comprende en su totalidad a la provincia de Cusco y parte de otras limítrofes como son: Urubamba, Anta, Paruro, Quispicanchi y Calca. Los incendios desarrollados dentro de este espacio son clasificados desde "Moderado" a niveles superiores, dándose una mayor tendencia por los valores "Extremo". El segundo foco se encuentra al sur ("g34"), especialmente en la provincia de Espinar, aquí se da un menor grado de concentración respecto al primero, pero con la peculiaridad de un recuento de niveles "Altos" y "Extremo" en todos sus casos. En la zona de transición que separa el centro del sur están las cuadrículas "g26" y "g33" que registran valores medios de incendios y variada clasificación de intensidad en extinción.

Las provincias incluidas son Acomayo, Canas, Canchis, Chumbivilcas y Paruro. El último foco se registra en la selva cusqueña, la grilla "g17" inmersa en la provincia de La Convención es el registro más elevado de incidencias (51), sin embargo, por las condiciones lluviosas y húmedas de la zona hace que estos eventos estén clasificados en intensidades de "Moderado" para abajo. Las provincias que limitan con este cuadrante son zonas de transición entre el centro y norte, se registra un aislado número de incidencias acompañado de gran dispersión y baja intensidad.

- 3) Dentro del registro de incendios forestales trabajados en esta investigación, se muestra que la temporada de incendios comienza significativamente en el mes de Junio, presentando su foco máximo en Agosto y finalizando en Noviembre. Comparándolo con los resultados del "FWI" se puede llegar a concluir que el índice responde satisfactoriamente con la temporalidad de los incendios. En los meses de verano se detecta en toda la región niveles bajos de peligrosidad referente al desarrollo de incendios. Las categorías "Muy Bajo" y "Bajo" son fuertemente reconocidos en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril, Mayo, Noviembre y Diciembre; mientras que en los otros meses se cuentan como ausentes o de bajo conteo. Los meses no mencionados corresponden a la temporada de invierno y parte de primavera en donde el índice reconoce la misma tendencia de días con registro de incendios con las categorías "Alto" y "Extremo", existiendo un alto nivel de coincidencia entre las mismas. A medida que se registró el máximo de incidencias en Agosto el índice respondió con "Extremo".

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Un acceso libre a la información de la red de estaciones meteorológicas en superficie del departamento de Cusco, ya que ello ayudaría en gran medida a calibrar el índice de incendios forestales. Se espera que en un futuro se pueda extraer información diaria para un record de años y tiempo presente.
- El criterio de emplear información meteorológica del ERA-Interim responde a la dificultad de acceso a los datos meteorológicos en la región Cusco; sin embargo estos resultados son altamente significativos con la realidad. De igual forma a lo planteado en esta tesis se podría realizar estudios con otros modelos atmosféricos de mejor resolución, dejando la posibilidad de generar pronósticos de intensidad de incendios para 3 a 7 días.
- Los reportes de incendios forestales en Cusco están altamente dispersos, no se encuentra exactamente un compendio total de los registros, ya que instituciones según su competencia en el tema tienden a restringir tal información o no detallar minuciosamente la emergencia. Por lo que se recomienda que el gobierno regional de Cusco, cuente con una oficina que registre la ocurrencia de los incendios forestales, siguiendo el formato desarrollado por la facultad de ciencias forestales de la UNALM.
- El código informático propuesto en la tesis puede mejorarse, pudiendo establecer sentencias de automatización en los procesos. De esta forma podría reducirse las horas de pre procesamiento de la información.
- Tomar en cuenta que los límites críticos establecidos para el índice fueron escogidos en base a la bibliografía del autor (Van Wagner, 1982). Se recomienda realizar estudios de validación en campo, como el desarrollado por William J. Groot en 2005.

VII. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. Anon. 1969. A handbook on proper care and use of fire weather instruments. Victoria, B.C. Forest Protection Division, B.C. Forest Service, Forest Protection Handbook Series No. 4.
2. Avalos. 2005. Validación del pronóstico de precipitación del modelo regional Eta/SENAMHI durante periodos secos y lluviosos. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. 98 pp., UNALM.
3. Byram, G.M. 1959. Combustion of forest fuels. In: Davis, K. (Ed.), Forest Fire Control and Use. McGraw-Hill, New York (Chapter 3), pp. 61e89.
4. Carvalho, A, Flannigan, MD, Logan, K, Miranda, AI, Borrego, C. 2008. Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. International Journal of Wildland Fire 17, 328-338.
5. Calle M. V. 1991. Incursión de un Frente Frío en la Selva Peruana y su Efecto en los Cultivos. Tesis de Ingeniero Meteorólogo UNALM, Lima- Perú.
6. Cheney, P., Sullivan, A. 2008. Grassfires: Fuel, Weather and Fire Behaviour, second ed. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.
7. De Groot, WJ, Field, JRD, Brady, MA, Roswintarti, O, Mohamad, M. 2007. Development of the Indonesian and Malaysian Fire Danger Rating Systems. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 12, 165-180.
8. ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). 2015. IFS DOCUMENTATION Cy41r1 (cap 4, pp. 113-156). En su: Physical Processes. UK.
9. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2006. Situación de los Incendios Forestales en Bolivia: Análisis y Recomendaciones para la estrategia de manejo del fuego. Departamento Forestal. La Paz, Bolivia. 98 p.
10. Ferreira, O. 1970. Estudio de las variables climáticas como base para la elaboración de índices de grado de peligro en 2 zonas de Chile. Tesis, Ing. Forestal, Univ. de Chile, Santiago, 59 pp.
11. Fischer, W.C. and C.E. Hardy. 1976. Fire-Weather Observers-Handbook USDA. Washington D.C. Forest Service, Agric. Hdbk. 494.

12. Forestry Canada Fire Danger Group. 1992. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Behaviour Prediction System. Forestry Canada, Ottawa, ON, Information Report ST-X-3.
13. García, J. 1979. Circulación Atmosférica Sudamericana. Tesis de Ingeniero Meteorólogo UNALM, Lima - Perú.
14. Guedes, R. L. 1985. Condições de grande escala associadas a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul. Tese de Mestrado, IAG/USP, 89pp.
15. Holton J.R. 1990. Introducción a la Meteorología Dinámica. Departamento de Ciencias de la Atmósfera. Universidad de Washington. Seattle. Washington. USA. Versión en Español Ed. Instituto Nacional de Meteorología. 2ª Ed. ISBN: 84-7837-052-8.
16. Lawson, B.D. 1977. Fire Weather Index - the basic for fire danger rating in B.C. Environment Canada. Victoria, B.C. Forestry Service.
17. Manta, M. 1998. Programa de prevención de incendios forestales para el Departamento de Piura. Unidad Operativa de Proyectos Especiales del Ministerio de Agricultura. Lima, Perú. 52 p.
18. Manta, M. 2003. Estructura y funcionamiento de dos índices de peligro meteorológico de incendios forestales. Aplicación a tres zonas climáticas de España peninsular. Tesis de Doctorado en Montes. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 333p.
19. Manta, M.; León, H. 2004. Los Incendios Forestales del Perú: Grave problema por resolver. Floresta (Brasil) 34(2).179-189. ISSN 00153826.
20. Manta, M; Mestre, A.; Viegas, D. 2006. Economical value of two meteorological wildfire risk indexes in Spain. Forest Ecology and Management. 234(1):S64 ISSN 0378-1127.
21. Manta, M. 2007. Evaluación de las causas naturales y socioeconómicas de los incendios forestales en América del Sur. In Cuarta conferencia mundial de Incendios Forestales. Editado por J. Goldammer. Sevilla, España del 11-14 de mayo. p. 1-17
22. Manta, M.I. 2017. Contribución al conocimiento de la prevención de los incendios forestales en la sierra peruana. UNALM. Lima, Perú. 250 P. ISBN Obra Independiente: 978-612-4147-86-9.

23. Marengo, et. al, 2000. Identificación de casos de Jets en niveles bajos, del norte (SALLJ) y del sur (SJ) al este de los Andes durante el verano y otoño 1999, (CPTEC/INPE).
24. McArthur, A. G. 1967. Fire Behaviour in Eucalypt Forests. Department of National Development Forestry and Timber Bureau, Canberra, Leaflet 107.
25. Muraro, S.J., Russel, R.N. and B.D. Lawson. 1969. Development of diurnal adjustments tables for the Fine Fuel Moisture Code. Canadian Forest Service, Pacific Forestry Research Center, Information Report BC-X-35. Victoria, BC.
26. OMM (Organización Meteorológica Mundial). 1992. Glosario Meteorológico Internacional OMM - N° 182. Organización Meteorológica Mundial Ginebra–Suiza.1993. Segunda Edición, 759 pp.
27. Quispe G., Nelson. 2005. Condiciones Sinópticas de la Incursión de una Masa de Aire Frío en Sudamérica y su Impacto en los Cultivos de la Selva Caso específico: Verano de 1996 e invierno de 2000. Tesis para optar el Título de de INGENIERO METEOROLOGO. UNALM, Lima – Perú.
28. Rothermel R.C., Wilson R.A., Morris G.A., Sackett S.S. 1986. Modeling moisture content of fine dead wildland fuels: input to the BEHAVE Fire Prediction System. USDA Forest Service, Intermountain Research Station Research Paper INT-359. Ogden, UT.
29. SENAMHI. (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2007. Escenarios de cambio climático en la cuenca del río Urubamba para el año 2100. Por: Avalos G., Díaz A., Oria C., Acuña D., Metzger L., Rosas G. y Miguel R. Eds. Senamhi Perú, 120 pp.
30. Simard. A.J. 1970. Computer program to calculate the Canadian Forest Fire Weather Index. Environ. Can.,Can. For. Serv. Forest Fire Res. Ins., Internal Rep. FF-12. 18 p.
31. Turner, J. A. 1972. The Drought Code component of the Canadian Forest Fire Behavior System. Canadian Forestry Service, Publication 1316.
32. Van Wagner, C. E. 1974. Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Canadian Forestry Service, Ottawa, ON, Publication No. 1333.
33. Van Wagner, T.L. Picket. 1975. Equations and Fortran IV Program for the 1976 metric version of the Forest Fire Weather Index. Petawa, Canada. Forestry Service.
34. Van Wagner, C. E. 1977: A method of computing fine fuel moisture content throughout the diurnal cycle. Canadian Forestry Service, Petawawa For. Exp. Sta., Chalk River, Ont. Inf. Rep.PS-X-69.

35. Van Wagner, C.E. 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forestry Research*, 7: 23-34.
36. Van Wagner C.E. 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Forestry Technical Report 35. Ottawa, Canada.
37. Van Wagner, C.E. 1989. Prediction of crown fire behavior in conifer stands. Pages 207-212 in *Proceedings of Tenth Conference of Fire and Forest Meteorology* (April 17-21, Ottawa, Ontario). Forestry Canada, Ottawa, Ontario.
38. Van Wagner, C.E. 1993. Prediction of crown fire behaviour in two stands of jack pine. *Canadian Journal of Forestry Research* 23: 442-449.
39. Viegas, D. X., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A. and Sol, B. 1999. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 9(4), 235–246pp.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco del día 12 de Octubre del 2010 en donde informan sobre damnificados por efectos de un incendio forestal.

CIUDAD // **CORREO • CUSCO** 5
MARTES 12 DE OCTUBRE DE 2010
FOTO: RAÚL CABRERA RAMOS

EN DOS COMUNIDADES DE CANAS

Incendio deja sin casa a 15 familias

CUSCO. Al menos 15 familias de las comunidades de Anasaya y Consapata, del distrito de Checa (Canas), quedaron a la intemperie tras haberse incendiado sus viviendas. El alcalde de Checa, César Chayña Carpio, acompañado de los damnificados, llegó a la ciudad del Cusco e informó del hecho. Chayña dijo que el voraz incendio se produjo entre el 3 y 8 de octubre en circunstancias que unos niños habrían estado manipulando el fuego. Carpio sostuvo que aparte de las casas unas 3 mil hectáreas de pastos naturales se quemaron en estas dos comunidades por lo que los animales se quedaron sin alimentos. Sin embargo, el burgomaestre sostuvo que la población afectada supera los 150, puesto que muchos de ellos perdieron sus ovinos y otros enseres.

APOYO. El alcalde junto los dos presidentes de las comunidades afectadas pidieron urgente apoyo. Hernán Antonio Huayta, presidente de la comunidad de Consapata, dijo que requieren calaminas y alimentos para poder vivir. ■

RAÚL CABRERA RAMOS



Comuneros afectados por el incendio

Anexo 2: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco del día 20 de Julio del 2011 donde explica la perdida de áreas de cultivo por efectos de un incendio forestal.

CIUDAD CORREO • CUSCO 7
MIÉRCOLES 20 DE JULIO DEL 2011

EN CHECACUPE-CANCHIS

Gigantesco incendio forestal arrasa con cultivos

|| Siniestro destruyó más de 20 hectáreas de sembríos de papas, habas, entre otros

AMILCAR CUELLAR RADO
arado@epensa.com.pe

fauna silvestre existentes en el lugar.

AFECTADOS. La Policía Nacional ha efectuado la indagaciones preliminares respecto a quién o quienes provocaron el incendio forestal, obteniendo como respuesta por parte de los moradores de la zona que el incidente habría sido ocasionado por el comunero identificado como Luis Cuevas Casa (60), en circunstancias en que realizaba labores agrícolas. En tanto, se continúan con las acciones a fin de apagar el incendio, cabe señalar que el Comité de Defensa Civil evaluará los daños e identificará a los afectados. Finalmente, a las 19:30 horas del mismo día, se pudo controlar el incendio gracias a la valerosa acción que cumplieron los efectivos policiales, bomberos y pobladores de la zona. Felizmente no se reportaron la pérdida de vidas humanas hasta el momento. ||

CANCHIS. Un contingente de efectivos policiales, agentes bomberiles y pobladores de la zona se constituyeron hasta la comunidad de Suttoc en el distrito de canchino de Checacupe con la única finalidad de amagar el incendio forestal que arrasó con más de 20 hectáreas de terreno. El incendio se inició al promediar las 12:40 en el cerro denominado “Talle”, en Canchis.

EMERGENCIA. Pese al denodado esfuerzo por amagar el fuego, era avivado por los fuertes vientos del sector, se supo que el siniestro habría afectado aproximadamente 20 hectáreas de terrenos con pastizales, sembríos de cultivos como cebada, avena, ollucos, habas, y otros, quedando todo reducido a cenizas, así como especies diversas de flora y la

FOTO: CORREO



SINIESTRO. Al parecer habría sido un comunero de la zona quien inició el incendio.

Anexo 3: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco del día 2 de Setiembre del 2008 en donde se explica la perdida de cabezas de ganado por efecto de un incendio forestal.

Cusco, **martes** 2 de setiembre del 2008 Provincias **5** Correo

También fueron afectadas 2 mil hectáreas de pastos naturales en Canas

En incendio forestal mueren más de 100 camélidos



DEBESABER →

La policía investiga el caso y busca a los comuneros causantes de este siniestro que acabó con la vida de varios animales, afectando el ecosistema de la localidad.

LAS LLAMAS afectaron a un gran número de animales de la zona.

Canas/Raul Cabrera Ramos

El director de Agricultura de la Región Cusco, Mateo Quispe refirió que son más de 100 animales entre ovinos y camélidos que murieron en el incendio ocurrido en la comunidad de Quehue, provincia de Canas que se suscitó el pasado 28 de agosto. El titular de Agricultura, dijo que son: 58 alpacas, 61 ovejas, 6 vacas y 2 caballos las que fallecieron en este incendio de grandes proporciones que afectó al menos 2 mil hectáreas de pastos naturales en la zona y además sostuvo que unos 300 animales entre ovinos y camélidos también sufrieron las consecuencias del voraz incendio. Al respecto, Mateo Quispe dijo que la Agencia Agraria de la provincia de Canas viene realizando un informe completo para tener una información certera del hecho, el mismo que refirió que existen también familias que fueron afectadas. Finalmente, afirmó que la Dirección Regional de Agricultura del Cusco mediante sus oficinas agrarias de la provincias iniciarán de inmediato las atenciones médicas, para lo cual ya enviaron 1,249 dosis de vacunas para los animales afectados en la zona del desastre.



PASTOS quedaron en cenizas.

Anexo 4: Recorte periodístico del diario “El Diario del Cuzco” del día 21 de Setiembre del 2010 donde se informa sobre el riesgo de incendio en la zona arqueológica de Macchu Picchu.

14 | local | el diario del cuzco, martes 21 de setiembre de 2010

Población agradeció bendición del cielo

Bendita lluvia evitó mayor propagación de incendio forestal en Machu Picchu

Al cierre de edición habían mínimos focos en zona cero

Ayer a las 18 y 20 horas una fuerte precipitación pluvial se registró en la zona de Machu Picchu, donde la población estaba alarmada por el incendio forestal iniciado en la víspera en la zona del cerro Calvario, las gotas de la lluvia cayeron con profusión y motivó un estallido de alegría entre los pobladores y los visitantes. Mientras tanto los equipos de trabajo que se encontraban en la zona del incendio se confundieron en abrazos ante la inmensa ayuda que recibían de los cielos para sofocar el fuego que amenazaba inclusive llegar hasta el camino inca y alrededores de la ciudad inca. “Es una bendición del cielo se hacía difícil combatir el siniestro, no lo podíamos creer, cuando menos lo esperábamos cayó la lluvia y ayudó a evitar que el fuego se propague”, precisó el periodista Efraín Chunja, que se hallaba en la zona de emergencia.

En horas de la tarde se precisó que las visitas al Santuario Histórico de Machu Picchu y el ingreso al Camino Inca, se realizan sin restricción alguna, pese al incendio iniciado en el cerro Calvario y se desplazaba por la quebrada del Aobamba, según informó el Instituto Nacional de Cultura (INC).

El incendio se registró a la altura del sector denominado Hidro (kilómetro 122 vía ferroviaria), en el cerro Calvario, donde se ubica el túnel de desfogue de la central hidroeléctrica de Machu Picchu. Cabe recordar que el año 1997 en la misma zona se inició el incendio que llegó hasta proximidades de la ciudad inca e inclusive afectó el Huayna Picchu.

El director del Parque Arqueológico de Machu Picchu, Fernando Astete Victoria, dijo que personal profesional y técnico evalúa los daños del incendio forestal. Para ello hace el mapeo de la zona y el monitoreo correspondiente. Del mismo modo, Astete Victoria informó que el incendio no afecta ni compromete ningún monumento arqueológico que se ubica en el área que comprende el santuario histórico de Machu Picchu.

Cabe precisar que ayer en la tarde se determinó cerrar el tránsito de turistas por el kilómetro 122 de la vía férrea en previsión de cualquier eventualidad. En consecuencia los operadores turísticos deben evitar trasladar visitantes por el sector de Mollepata y Santa María – Santa Teresa, se asumió también la decisión de cerrar los accesos a pequeños centros arqueológicos de la zona, pero se ratificó que el ingreso a Machu Picchu no ha sido suspendido y las visitas se desarrollan con total normalidad. Mientras tanto al cierre de edición se precisó que en la zona se observaban limitados focos de fuego en la zona, donde horas antes se estaba haciendo imposible controlarlo, se espera que en la madrugada se hayan extinguido, sin embargo grupos operativos llegarán muy temprano para efectuar las acciones correspondientes.



Intensos trabajos se desarrollaron ayer para sofocar fuego.

Anexo 5: Recorte periodístico del diario “Correo” de Cusco donde se informa sobre el impacto en la salud de la población producido por la humareda generada en un incendio forestal.

Humareda afecta la salud de pobladores quillabambinos



INCENDIOS en la zona perjudican a quillabambinos.

La Convención/Smith Béjar

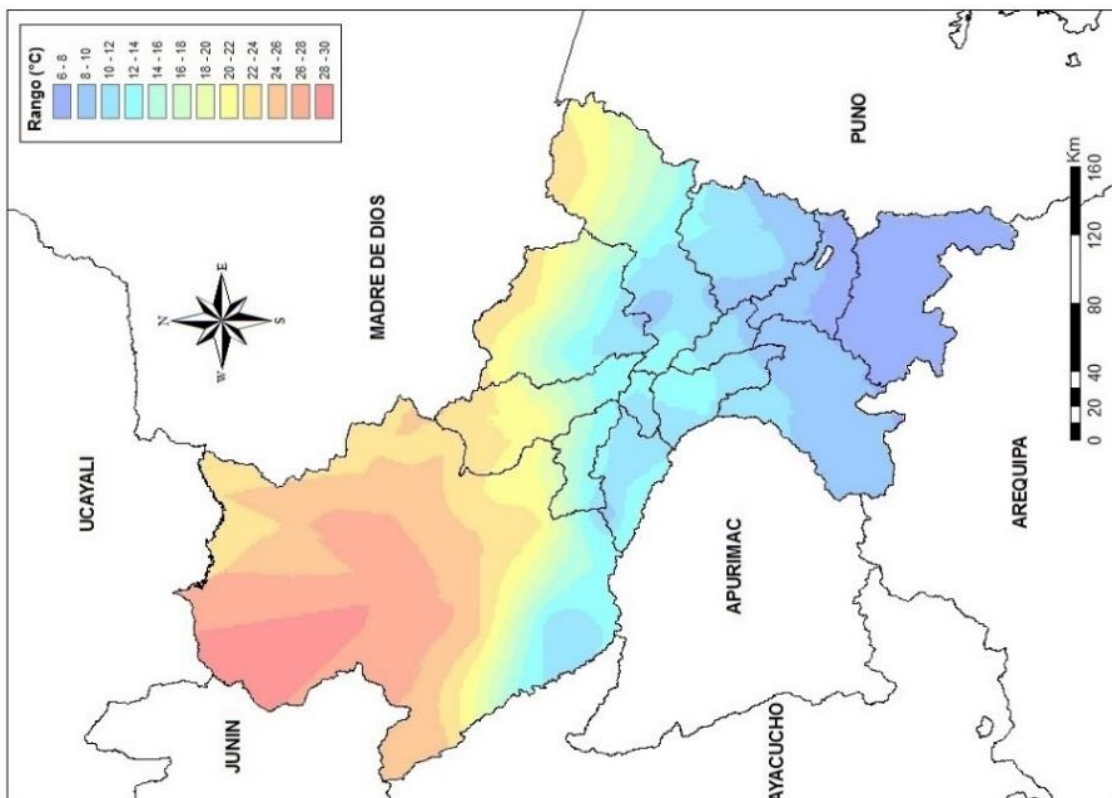
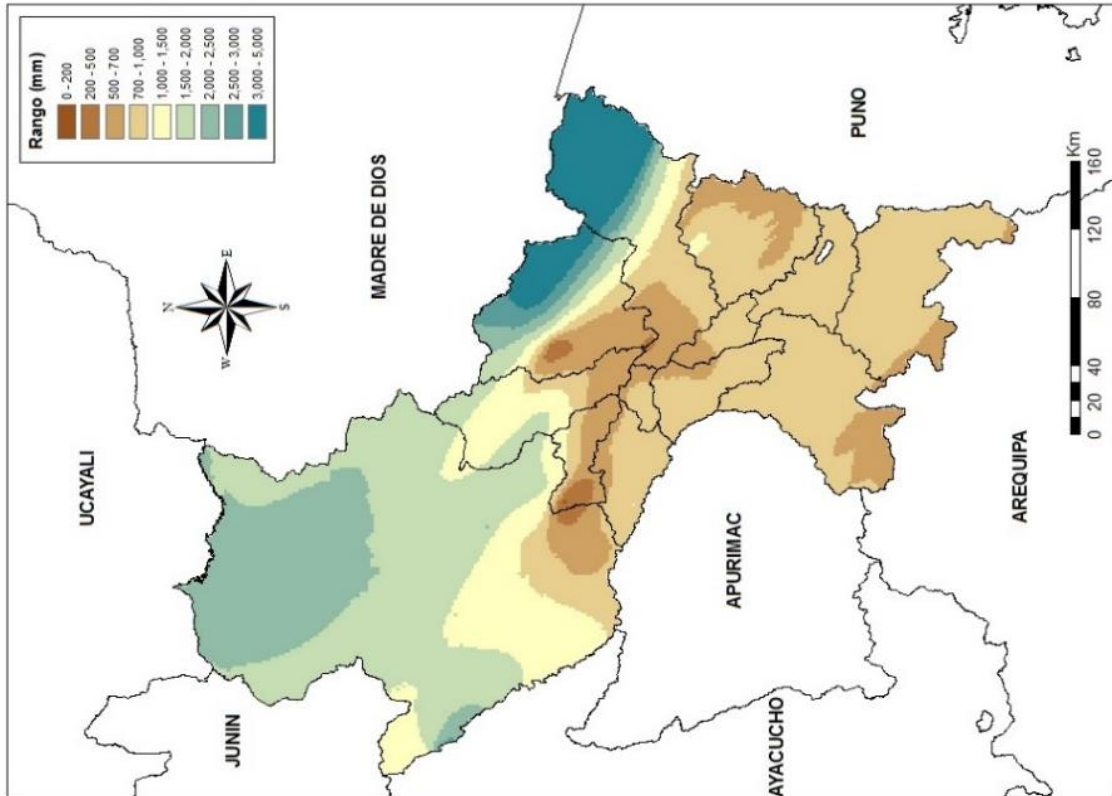
● Una densa humareda cu-

bre el cielo de Quillabamba y gran parte de la provincia de La Convención, como conse-

cuencia de los incendios forestales, quema de pastizales y roces en el interior de La Convención que realizan los agricultores.

El problema se repite todos los años, y ningún programa de capacitación o sensibilización ha podido funcionar, hecho que perjudica la salud de los quillabambinos, principalmente de niños y ancianos que vienen sufriendo infecciones respiratorias agudas (IRA), por lo que las autoridades del sector Salud, vienen invocando tener cuidado con el clima y el ambiente. No obstante, se produce en Quillabamba un intenso calor, que en algunos casos alcanza hasta los 28 y 29 grados centígrados; variación que se debe a los constantes incendios forestales.

Anexo 6: Mapas climáticos de temperatura del aire (Izquierda) y precipitación (derecha) para la provincia de Cusco. Modificación en base a los resultados propuestos por SENAMHI en 2013.



Anexo 7: Datos referenciales, Van Wagner 1985 "Equation and Fortran Program for the Canadian Forest Fire Weather Index System", pag 17

SAMPLE OF OUTPUT

PROGRAM NO.: F-32
12-FEB-85

FWI TEST DATA APRIL 13 TO MAY 31

INITIAL VALUES FOR PPMC: 85.0, DMC: 6.0, DC: 15.0

DATE	TEMP	RH	WIND	RAIN	PPMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI	DSR
4 13	17.0	42	25	0.0	87.7	8.5	19.0	10.9	8.5	10.1	1.63
4 14	20.0	21	25	2.4	86.2	10.4	23.6	8.8	10.4	9.3	1.40
4 15	8.5	40	17	0.0	87.0	11.8	26.1	6.5	11.7	7.6	0.98
4 16	6.5	25	6	0.0	88.8	13.2	28.2	4.9	13.1	6.2	0.68
4 17	13.0	34	24	0.0	89.1	15.4	31.5	12.6	15.3	14.8	3.22
4 18	6.0	40	22	0.4	88.7	16.5	33.5	10.7	16.4	13.5	2.71
4 19	5.5	52	6	0.0	87.4	17.2	35.4	4.0	17.1	5.9	0.62
4 20	8.5	46	16	0.0	87.4	18.5	37.9	6.6	18.4	9.7	1.50
4 21	9.5	54	20	0.0	86.8	19.7	40.6	7.4	19.6	11.0	1.89
4 22	7.0	93	14	9.0	29.9	10.1	29.5	0.0	10.9	0.0	0.00
4 23	6.5	71	17	1.0	49.4	10.7	31.6	0.4	11.6	0.2	0.00
4 24	6.0	59	17	0.0	67.3	11.4	33.7	1.3	12.3	0.9	0.02
4 25	13.0	52	4	0.0	77.8	13.0	37.0	1.1	13.9	0.8	0.02
4 26	15.5	40	11	0.0	85.5	15.4	40.7	3.9	15.9	5.5	0.56
4 27	23.0	25	9	0.0	91.5	19.8	45.8	8.4	19.8	12.2	2.27
4 28	19.0	46	16	0.0	89.9	22.5	50.2	9.5	22.4	14.3	3.02
4 29	18.0	41	20	0.0	90.0	25.2	54.4	11.7	25.1	17.7	4.40
4 30	14.5	51	16	0.0	88.4	27.0	57.9	7.7	27.0	13.3	2.65
5 1	14.5	69	11	0.0	85.7	28.3	63.0	4.0	28.2	8.0	1.08
5 2	15.5	42	8	0.0	87.4	30.8	68.2	4.4	30.8	9.1	1.35
5 3	21.0	37	8	0.0	89.4	34.5	74.3	5.9	34.4	12.3	2.30
5 4	23.0	32	16	0.0	91.0	38.8	80.9	11.1	38.7	21.0	5.96
5 5	23.0	32	14	0.0	91.2	43.1	87.4	10.3	43.0	21.1	5.99
5 6	27.0	33	12	0.0	91.7	48.1	94.7	9.9	47.9	21.7	6.30
5 7	28.0	17	27	0.0	95.2	54.5	102.1	34.5	54.3	52.6	30.20
5 8	23.5	54	20	0.0	89.7	57.4	108.8	11.3	57.2	25.9	8.61
5 9	16.0	50	22	12.2	62.2	29.9	91.8	1.4	33.0	3.0	0.19
5 10	11.5	58	20	0.0	76.7	31.3	96.3	2.3	34.5	5.4	0.55
5 11	16.0	54	16	0.0	83.5	33.4	101.6	3.8	36.7	8.9	1.31
5 12	21.5	37	9	0.0	88.7	37.1	107.8	5.6	39.9	12.8	2.46
5 13	14.0	61	22	0.2	86.7	38.7	112.8	8.1	41.6	17.3	4.24
5 14	15.0	30	27	0.0	89.6	41.7	117.9	15.9	44.2	28.8	10.44
5 15	20.0	23	11	0.0	92.1	45.9	123.9	10.1	47.7	21.9	6.40
5 16	14.0	95	3	16.4	21.3	20.1	97.0	0.0	26.5	0.0	0.00
5 17	20.0	53	4	2.8	51.0	18.3	103.0	0.2	25.3	0.2	0.00
5 18	19.5	30	16	0.0	82.3	22.1	108.9	3.3	29.3	6.8	0.81
5 19	25.5	51	20	6.0	75.4	16.4	106.4	2.1	23.7	3.8	0.29
5 20	10.0	38	24	0.0	84.3	18.2	110.6	6.4	25.8	11.3	1.99
5 21	19.0	27	16	0.0	90.3	22.1	116.4	10.0	29.9	17.2	4.19
5 22	26.0	46	11	4.2	77.6	18.7	117.7	1.6	26.8	2.9	0.18
5 23	30.0	38	22	0.0	90.2	23.8	125.5	13.4	32.3	22.0	6.49
5 24	25.5	67	19	12.6	65.3	13.1	108.5	1.4	20.2	1.9	0.08
5 25	12.0	53	28	11.8	55.4	7.7	91.6	1.2	12.8	0.8	0.02
5 26	21.0	38	8	0.0	80.8	11.3	97.8	1.9	17.6	2.6	0.14
5 27	13.0	70	20	3.8	61.7	8.4	97.9	1.2	13.8	0.9	0.02
5 28	9.0	78	24	1.4	64.5	9.0	101.9	1.7	14.7	2.0	0.09
5 29	11.0	54	16	0.0	77.6	10.5	106.3	2.0	16.8	2.8	0.17
5 30	15.5	39	9	0.0	85.4	13.1	111.5	3.5	20.3	5.8	0.61
5 31	18.0	36	5	0.0	88.5	16.3	117.1	4.4	24.2	7.9	1.06

Anexo 8: Registro de incendios forestales recopilados desde 1995 al 2014 (Parte 1).

Fecha	Provincia	Distrito	Fecha	Provincia	Distrito
24/06/1995	Cusco	Cusco	17/08/2003	Espinar	Yauri
9/07/1995	Urubamba	Machu Picchu	20/08/2003	Cusco	San Jeronimo
3/08/1995	Chumbivilcas	Santo Tomas	8/09/2003	Cusco	Cusco
7/08/1995	La Convencion	Santa Ana	21/09/2003	Urubamba	Maras
21/08/1995	La Convencion	Echarate	22/09/2003	Urubamba	Ollantaytambo
25/08/1995	La Convencion	Huayopata	6/10/2003	Urubamba	Machupicchu
28/08/1995	La Convencion	Vilcabamba	18/10/2003	Cusco	Cusco
29/08/1995	La Convencion	Quellouno	17/11/2003	Cusco	San Jeronimo
31/08/1995	La Convencion	Santa Ana	14/07/2004	Paruro	Accha
31/08/1995	La Convencion	Acobamba	1/08/2004	Quispicanchi	Oropesa
6/09/1995	Urubamba	Urubamba	1/08/2004	Quispicanchi	Quiquijana
12/09/1995	Espinar	Yauri	26/06/2005	Cusco	Saylla
8/10/1995	La Convencion	Santa Ana	1/07/2005	Urubamba	Machu Picchu
8/10/1995	Anta	Anta	3/07/2005	Urubamba	Machu Picchu
8/10/1995	Canchis	Sicuani	11/07/2005	Canchis	Checacupe
10/10/1995	Anta	Huarocondo	13/07/2005	Urubamba	Machu Picchu
12/10/1995	Paruro	Paruro	24/07/2005	Calca	San Salvador
16/10/1995	Paruro	Accha	1/08/2005	Calca	Yanatile
16/10/1995	Paruro	Huanoquite	5/08/2005	Calca	Calca
26/10/1995	Paruro	Ccapi	15/08/2005	Urubamba	Urubamba
5/11/1995	Cusco	San Jeronimo	20/08/2005	La Convencion	Quellouno
12/06/1996	La Convención	Santa Teresa	22/08/2005	Canchis	Sicuani
5/07/1996	La Convención	Santa Teresa	23/08/2005	Urubamba	Machu Picchu
11/07/1996	Quispicanchis	Marcapata	25/08/2005	Calca	Pisac
11/07/1996	Quispicanchis	Urcos	26/08/2005	Canchis	Sicuani
21/09/1996	Urubamba	Urubamba	29/08/2005	Paruro	Yaurisque
2/09/1997	Urubamba	Machu Picchu	10/09/2005	Calca	Calca
6/09/1997	Urubamba	Machu Picchu	20/09/2005	Calca	Calca
22/09/1997	Cusco	San Sebastian	28/09/2005	Urubamba	Machu Picchu
31/07/1998	La Convencion	Santa Ana	3/10/2005	Cusco	Cusco
5/08/1998	Urubamba	Machu Picchu	2/11/2005	Canchis	Combapata
7/08/1998	Canchis	Combapata	12/07/2006	Calca	Calca
8/08/1998	Urubamba	Yucay	13/07/2006	Calca	Calca
27/08/1998	Urubamba	Urubamba	19/07/2006	Paucartambo	Challabamba
13/09/1998	Calca	San Salvador	20/07/2006	Cusco	Saylla
24/09/1998	Urubamba	Machu Picchu	6/08/2006	Urubamba	Machu Picchu
5/10/1998	Anta	Limatambo	4/09/2006	Anta	Limatambo
27/07/1999	Calca	Calca	7/09/2006	Cusco	Saylla
5/08/1999	Chumbivilcas	Livitaca	8/09/2006	Cusco	San Jeronimo
10/08/1999	Urubamba	Machupicchu	15/10/2006	Anta	Zurite
30/08/1999	Paucartambo	Paucartambo	2/08/2007	La Convencion	Santa Ana
30/08/1999	La Convencion	Santa Ana	3/08/2007	La Convencion	Santa Ana
10/09/1999	La Convencion	Santa Ana	22/08/2007	Urubamba	Urubamba
11/09/1999	Cusco	San Jeronimo	9/09/2007	Cusco	Saylla
7/06/2000	Quispicanchi	Urcos	16/09/2007	Calca	Calca
25/07/2000	Cusco	San Jeronimo	14/11/2007	Espinar	Alto Pichigua
3/08/2000	Cusco	San Jeronimo	2/06/2008	Quispicanchi	Lucre
17/09/2000	Cusco	San Jeronimo	28/08/2009	La Convención	Santa Teresa
3/10/2000	La Convencion	Santa Ana	3/09/2009	Urubamba	Machu Picchu
3/09/2001	Urubamba	Machupicchu	4/09/2009	Urubamba	Machu Picchu
18/08/2002	Cusco	Saylla	5/09/2009	Espinar	Alto Pichigua
21/10/2002	Calca	Calca	31/10/2009	Cusco	San Sebastián
21/10/2002	Cusco	San Jeronimo	12/06/2010	Canchis	Sicuani
16/07/2003	La Convencion	Santa Teresa	13/06/2010	Canchis	Sicuani

Anexo 9: Registro de incendios forestales recopilados desde 1995 al 2014 (Parte 2).

Fecha	Provincia	Distrito	Fecha	Provincia	Distrito
14/06/2010	Canchis	Sicuani	3/10/2012	Anta	Limatambo
18/08/2010	La Convención	Pichari	6/10/2012	Calca	Pisac
13/09/2010	La Convencion	Santa Ana	21/10/2012	Espinar	Coporaque
14/09/2010	La Convencion	Santa Ana	22/10/2012	Espinar	Pallapata
15/09/2010	La Convencion	Santa Ana	23/10/2012	Canas	Yanaoca
16/09/2010	La Convencion	Santa Ana	27/11/2012	Calca	Pisac
16/09/2010	La Convencion	Santa Ana	17/06/2013	Espinar	Pichigua
18/09/2010	Urubamba	Machu Picchu	28/06/2013	Espinar	Yauri
21/09/2010	La Convencion	Santa Ana	30/06/2013	Espinar	Pichigua
2/10/2010	Canas	Kunturkanki	18/07/2013	Cusco	Saylla
12/10/2010	Espinar	Yauri	20/07/2013	Espinar	Yauri
25/10/2010	Espinar	Pichigua	29/07/2013	Espinar	Pichigua
1/11/2010	Espinar	Suycktambo	7/08/2013	Espinar	Coporaque
10/06/2011	La Convención	Santa Teresa	8/08/2013	Espinar	Alto Pichigua
11/06/2011	La Convención	Santa Teresa	9/08/2013	Urubamba	Machu Picchu
2/07/2011	La Convención	Quellouno	10/08/2013	Quispicanchi	Cusipata
18/07/2011	Anta	Anta	12/08/2013	Anta	Limatambo
19/07/2011	Canchis	Sicuani	13/08/2013	Quispicanchi	Cusipata
24/07/2011	Quispicanchi	Lucre	15/08/2013	Cusco	Cusco
25/07/2011	Quispicanchi	Oropesa	18/08/2013	Canchis	Tinta
26/07/2011	Quispicanchi	Lucre	29/08/2013	Paucartambo	Paucartambo
30/07/2011	Quispicanchi	Andahuaylillas	31/08/2013	Chumbivilcas	Livitaca
31/07/2011	Espinar	Coporaque	1/09/2013	Paucartambo	Challabamba
1/08/2011	Espinar	Coporaque	17/08/2013	Quispicanchi	Oropesa
18/08/2011	Quispicanchi	Lucre	18/08/2013	Acomayo	Acos
22/08/2011	Espinar	Yauri	2/09/2013	Quispicanchi	Quiquijana
26/08/2011	La Convencion	Santa Teresa	3/09/2013	La Convencion	Santa Ana
28/08/2011	Urubamba	Machu Picchu	4/09/2013	Cusco	Cusco
29/08/2011	La Convencion	Santa Ana	13/09/2013	Paucartambo	Colquepata
31/08/2011	La Convención	Quillabamba	14/09/2013	Canchis	Marangani
2/09/2011	La Convencion	Quellouno	16/09/2013	Urubamba	Ollantaytambo
15/09/2011	Calca	San Salvador	17/09/2013	Espinar	Pichigua
12/10/2011	Urubamba	Urubamba	17/09/2013	Espinar	Yauri
17/10/2011	Calca	Calca	20/09/2013	Calca	Calca
18/10/2011	Calca	Calca	26/09/2013	Espinar	Ocoruro
21/10/2011	Calca	Calca	27/09/2013	Urubamba	Yucay
8/11/2011	La Convencion	Huayopata	29/09/2013	Anta	Limatambo
26/05/2012	La Convencion	Santa Teresa	2/10/2013	Espinar	Yauri
9/06/2012	Urubamba	Machu Picchu	7/10/2013	La Convencion	Echarate
24/07/2012	Espinar	Yauri	16/10/2013	Espinar	Alto Pichigua
25/07/2012	Espinar	Yauri	20/10/2013	Canas	Langui
2/08/2012	Quispicanchi	Cusipata	22/10/2013	Espinar	Pichigua
3/08/2012	Espinar	Coporaque	23/10/2013	La Convencion	Santa Teresa
6/08/2012	La Convencion	Echarate	15/11/2013	Canas	Yanaoca
7/08/2012	Cusco	Ccorca	17/11/2013	Canchis	Sicuani
8/08/2012	Cusco	San Sebastian	3/07/2014	Quispicanchi	Huaro
13/08/2012	Anta	Limatambo	5/07/2014	Espinar	Yauri
19/08/2012	Calca	Taray	21/08/2014	Calca	Pisac
21/08/2012	Espinar	Alto Pichigua	22/08/2014	Quispicanchi	Lucre
28/08/2012	Cusco	Cusco	22/08/2014	Quispicanchi	Oropesa
10/09/2012	La Convencion	Santa Ana	23/08/2014	Cusco	San Jeronimo
15/09/2012	La Convencion	Maranura	17/09/2014	Cusco	Cusco
16/09/2012	La Convencion	Quellouno	20/09/2014	Quispicanchi	Ccarhuayo
21/09/2012	Anta	Limatambo	14/10/2014	Urubamba	Ollantaytambo
25/09/2012	Cusco	Cusco	8/11/2014	La Convención	Quellouno
26/09/2012	Anta	Limatambo	9/11/2014	Calca	Pisac
2/10/2012	La Convencion	Santa Ana	17/08/2014	Espinar	Yauri

Anexo 10: Mapa de curvas de nivel Cuenca del río Urubamba, se evidencia una clasificación de hasta 3 zonas. Bajo nivel altitudinal en la zona norte, medios en el centro y altos en la zona sur donde nace la cuenca.

