



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-405

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017  
**ISBN 978-84-941695-2-6**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Evaluación y reducción del riesgo de incendios de origen eléctrico en el sur de California

BLANCO MARTÍNEZ, J.<sup>1</sup>, DIEZ VIZCAÍNO, F.J.<sup>1</sup>, MONEDERO TIMÓN, S.<sup>1</sup>, PÉREZ SUÁREZ, J.R.<sup>1</sup> y RAMÍREZ CISNEROS, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnosylva, SL.

### Resumen

Estudio orientado a la disminución y gestión del riesgo de incendios forestales provocados por incidencias de naturaleza eléctrica en los territorios del sur de California, en concreto en el condado de San Diego, por medio de la preparación de una cartografía de alta resolución de los modelos de combustible acompañada por el estudio de diferentes parámetros derivados de la dinámica fenológica con los que poder caracterizar y definir áreas cuyo riesgo de sufrir la aparición de nuevos focos de ignición sea elevada, combinando para ello información satelital de alta resolución espectral y espacial (1 metro) junto con un análisis potente de las variables meteorológicas que condicionan la aparición de los principales focos de ignición (vientos de Santa Ana), a lo que se le suma un intenso estudio de los distintos parámetros de la dinámica fenológica de los diferentes modelos de combustible (vigor y humedad de la vegetación media anual y diaria), permitiendo generar umbrales de control ante situaciones de riesgo y gestionar y controlar el territorio ante posibles situaciones de emergencia de naturaleza eléctrica, siendo la cartografía de combustibles y cortafuegos base esencial de todos los análisis y resultados del proyecto.

### Palabras clave

Comportamiento del fuego, modelo de combustible, corredores de viento, ventana fenológica, interfaz urbano-forestal

### 1. Introducción

California, en especial la zona sur de dicho Estado (donde predomina el chaparral californiano, una comunidad arbórea mediterránea semiárida más susceptible y adaptada al fuego (HANES, 1988)), sufre constantes incendios, de diferentes grados de severidad, durante todo el año debido a la consecución de numerosos factores con un alto potencial de peligrosidad cuando se presentan de forma conjunta: condiciones meteorológicas, estado fenológico deficiente de la vegetación o factores de riesgo externo como pueden ser las pruebas militares en la base de los marines Camp Pendleton o, con mayor importancia por su extensión en el terreno, los efectos perniciosos que los riesgos eléctricos muestran en esta zona.

Los riesgos eléctricos son considerados los causantes de un elevado número de incidencias forestales lo que hace imprescindible parametrizar el control de las mismas de forma que se prevean los efectos negativos sobre el terreno. Además, se debe tener en cuenta que estos efectos no solo se dan/centran en aspectos territoriales: los medios humanos y económicos se resienten considerablemente antes la presencia de focos de ignición. Esto muestra la enorme vulnerabilidad que acompaña a este tipo de incidencia de origen eléctrico por lo que es imprescindible poder controlar, prevenir y resolver las mismas de forma eficiente.

### 2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es prevenir, reducir y gestionar de forma eficiente el riesgo de incendios forestales provocados por incidencias de naturaleza eléctrica en los territorios del sur de California (Condado de San Diego), así como evaluar sus principales impactos, pues son los

causantes de importantes alteraciones en el comportamiento natural del estado de la vegetación y del terreno, sin olvidar el importante riesgo o daño que provocan, también, a nivel económico y humano.

### 3. Metodología

Para alcanzar el objetivo principal, se hace imprescindible preparar diferentes análisis, claves en el proceso de prevención y reducción y eficaces a la hora de analizar los efectos/repercusiones perniciosas que provocan los incendios forestales:

- A. Preparación de una cartografía de modelos de combustibles actualizada y de detalle, base de todos los análisis a realizar (de forma imprescindible) a posteriori.
- B. Análisis del dinamismo fenológico de la vegetación, con el que se revisa y parametriza el estado físico en el que se encuentran las especies vegetales, informando de su alta o baja probabilidad de sufrir una quema.
- C. Análisis del nivel de severidad/afectación que los incendios tienen en el terreno y la vegetación, de modo que sea posible entender en qué situaciones se producen y cómo se comportan en su evolución posterior, por medio del estudio de los parámetros meteorológicos (netCDF), claves en el proceso de aparición y propagación/avance de los incendios forestales.
- D. Análisis y reducción de la vulnerabilidad y los efectos que conllevan los incendios forestales a todos los niveles, por medio del desarrollo y diseño de un modelo científico de reducción del riesgo de incendios forestales (WRRM, Wildfires Risk Reduction Model) y de la preparación de un software de escritorio con el que poder evaluar y priorizar acciones de lucha contra los incendios forestales de forma que se reduzca o elimine su potencial de aparición.

La revisión final de todos estos análisis será clave a la hora de fijar pautas que eviten la aparición de nuevos incendios forestales o ayuden al control y reducción de los numerosos efectos que conllevan los mismos. La consecución y buena ejecución de los diferentes análisis a llevar a cabo en el proceso de prevención, reducción y gestión del riesgo de incendios forestales de origen eléctrico implica un desarrollo y preparación metodológica amplia con la que poder llegar a los resultados deseados. A continuación se especifican los principales desarrollos metodológicos llevados a cabo en los diferentes análisis:

#### A. Preparación de una cartografía de modelos de combustibles

La elaboración de una nueva cartografía de modelos de combustibles, actual y detallada, sobre la que poder analizar la distribución real de los combustibles en el terreno así como sus dinámicas de comportamiento y estado fenológico, era imprescindible para llegar a alcanzar el éxito de los objetivos planteados. Esta preparación cartográfica ex-novo requiere de la consecución de una serie de pasos metodológicos muy concretos que se van desde la obtención/adquisición de los datos hasta la elaboración cartográfica final (Figura 1).

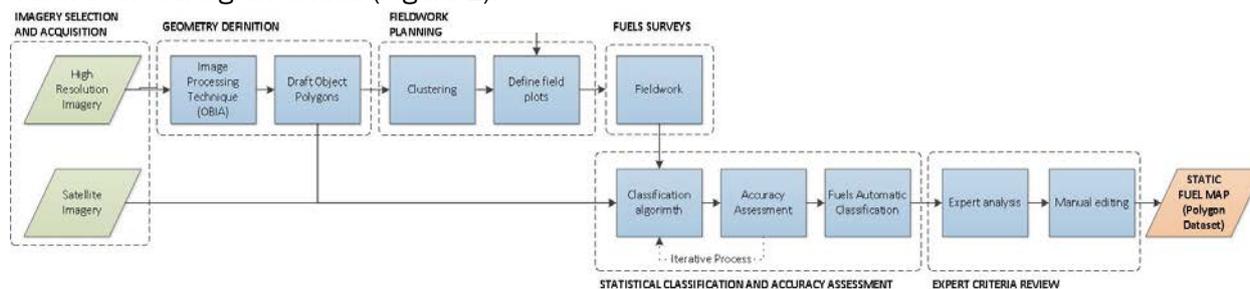


Figura1. Diagrama resumen del proceso de elaboración del mapa de modelos de combustible en San Diego

### A.1. Adquisición de los datos

Para la elaboración de la nueva cartografía de modelos de combustibles se hace imprescindible seleccionar y adquirir diferentes escenas/imágenes con información espectral.

Los datos que, desde determinadas franjas del espectro electromagnético, se pueden extraer de estas imágenes son crucialmente interesantes y juegan un papel muy importante a la hora de permitir discriminar comportamientos vegetales diferentes, inclusive dentro de una misma especie, los cuales pasarían desapercibidos en la fase de visualización.

En esta línea, se seleccionaron dos fuentes de datos espectrales diferentes:

- Escenas Landsat 8, en concreto dos escenas Landsat 8 seleccionadas en dos fechas diferentes las cuales representan dos momentos fenológicos opuestos: verano e invierno. Estas escenas, con 11 bandas con información diferente del espectro electromagnético (de las que solamente se seleccionaron 6) y una resolución espacial de 30 metros (resampleable a 15 metros mediante el uso de la imagen pancromática), fueron post-procesadas para convertir sus valores brutos a niveles de reflectancia, lo que permite hacer análisis comparativos entre ellas y elaborar/calcular productos derivados como son los índices de vegetación (en este caso, se calculó el NDVI, Normalized Difference Vegetation Index).
- Ortoimágenes del NAIP-CIR (The National Agriculture Imagery Program – Color-Infrared), del año 2012, con información espectral en la región del visible (RGB) y del infrarrojo cercano (NIR), y una excelente resolución espacial: 1 metro de tamaño de pixel.

Complementando estos datos, se hace necesario adquirir y preparar otros productos cartográficos necesarios en las tareas de elaboración cartográfica:

- Datos del terreno: selección del modelo digital del terreno ASTER y preparación, derivados del mismo, de los datos dependientes y orientaciones
- Cartografía previa de modelos de combustible, con fecha 2014 y una escala de trabajo más grosera, que sirva como base de referencia.
- Base cartográfica del Condado de San Diego, que incluye un gran conjunto de datos cartográficos auxiliares a tener en cuenta en los diferentes análisis: red de carreteras, red hidrográfica, tipos de vegetación, usos del suelo así como el parcelario entre otros.

Todos estos datos conforman la base informacional sobre la que se apoya la elaboración del nuevo mapa de modelos de combustible de San Diego.

### A.2. Definición geométrica del área de estudio: segmentación

La generación de una cartografía de modelos de combustible pasa por fragmentar el terreno del condado de San Diego en numerosas teselas de comportamiento espectral homogéneo, para luego poder asignar/agrupar dichas en alguna de las categorías de modelos de combustibles que se pretenden identificar. Para conseguir esto, se pone en práctica un análisis de imágenes orientado a objetos (OBIA).

El OBIA (Análisis de Imágenes Orientado a Objetos) es una técnica de clasificación centrada en criterios basados en el contexto espacial, empleada recientemente en el análisis de imágenes satelitales. Esta metodología de clasificación, de relativa actualidad si se compara con el análisis

tradicional de la imagen a nivel pixel (análisis de los valores espectrales recogido en cada uno de ellos), utiliza y gestiona la información espectral que se recoge a nivel celda no de forma individual si no como resultado de un conjunto de píxeles llamados objetos. Estos objetos de la imagen son, pues, grupos de píxeles cuyo comportamiento espectral muestra similitudes o rasgos definitorios próximos entre sí en relación al color, la forma y la textura, frente al comportamiento siempre dispar de sus vecinos más próximos (BLASCHKE, 2010).

La segmentación se controla por medio de la escala, el color y la forma, cuyos datos de entrada pueden ser parametrizados por medio de la supervisión basada en el criterio experto:

- Escala: se controla la heterogeneidad máxima permitida para cada segmento.
- Forma y color: la suma de ambos parámetros determina la cantidad de información de color y forma que se empleará en el proceso de segmentación.

A valores más altos de compactación se crearán segmentos más pequeños y más compactos, mientras que un valor más alto en el suavizado lleva a segmentos optimizados para tener bordes lisos, más acordes con los objetos naturales. El algoritmo empleado para realizar la segmentación es "Multiresolution Segmentation", el cual, genera objetos tan grandes como sea posible y tan detallados como sea necesario, empleando para ello el máximo color disponible manteniendo a su vez la forma tan alta como sea necesario, lo que permite obtener objetos con el borde óptimo (suavidad/compactidad). Al darle peso a la forma se le resta peso a la homogeneidad espectral de los objetos. Así, combinando la composición de bandas de las escenas Landsat 8, la composición de bandas de las ortoimágenes de las NAIP y la información del terreno, se lleva a cabo la segmentación del condado de San Diego (Figura 2).

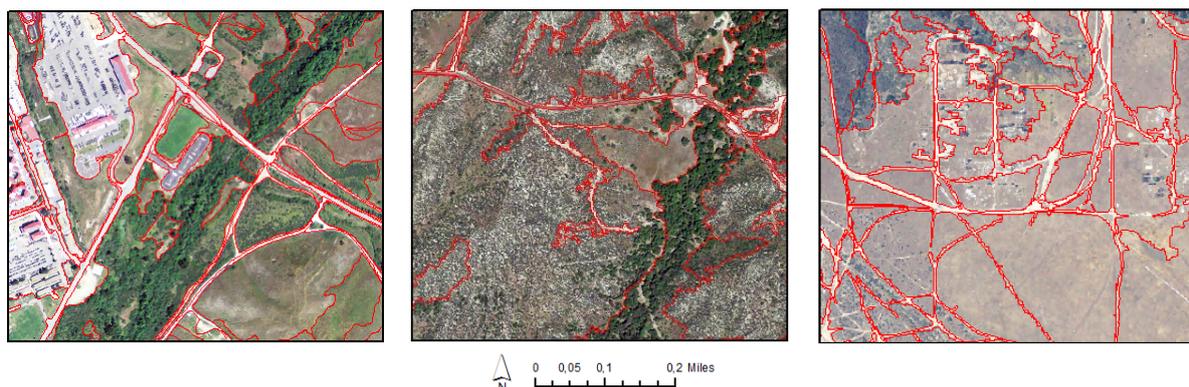


Figura2. Pequeñas muestras del detalle de las teselas obtenidas de la aplicación del OBIA en San Diego

La aparición de incendios transforma completamente la estructura y composición de la vegetación en el terreno. Las imágenes de referencia, a nivel especial, en el proceso de segmentación han sido las NAIP-CIR. Estas escenas, del año 2012, no recogen la información de los cambios acaecidos en el terreno como consecuencia de los incendios. Por este motivo, la definición de las teselas en estos sectores no se corresponderá con la realidad existente en el momento actual. Por esta razón, mediante el análisis del perímetro de los incendios posteriores a 2012, se hace una selección de las teselas afectadas en aras de programar su futura actualización en base a las condiciones reales del terreno tras el periodo de quema.

### A.3. Toma de verdad terreno

Para la correcta caracterización de las teselas en las que se ha fragmentado el terreno en alguna de las categorías de modelos de combustible, será necesario tomar datos de verdad terreno

tanto en campo como en gabinete. Pero antes de llevar a cabo la recolección de dicha información, será necesario definir:

- Definir el criterio y los parámetros (la metodología de SCOTT & BURGAN (2005) será escogida como la base conceptual de referencia respecto a la que caracterizar las diferentes teselas de modelos de combustible.
- Seleccionar las herramientas y métodos a utilizar:
  - Universal Bluetooth GPS Receiver XGPS150A, con precisión métrica
  - ASUS Transformer Book T100
  - ArcGIS 10.2
  - Cámara panorámica
- Localizar objetivamente un número estadísticamente representativo de teselas de verdad terreno de cada una de las categorías.

En aras de conseguir una muestra de información significativa y representativa de la verdad existente en el terreno, se prepara una clasificación no supervisada donde se definen 30 categorías de comportamiento homogéneo. En este tipo de clasificación todas y cada una de las teselas son asignadas a una misma clase si su comportamiento espectral es homogéneo (MATHER, 1998). En base a esta clusterización, se selecciona una muestra aleatoria de segmentos los cuales serán usados como base en el levantamiento de parcelas de campo.

De este modo, una vez preparada esta información, se procede a tomar datos de verdad terreno en campo. 2392 parcelas fueron levantadas durante 1 mes de trabajo para ser utilizadas como base en la clasificación estadística de los modelos de combustible (Figura 3).

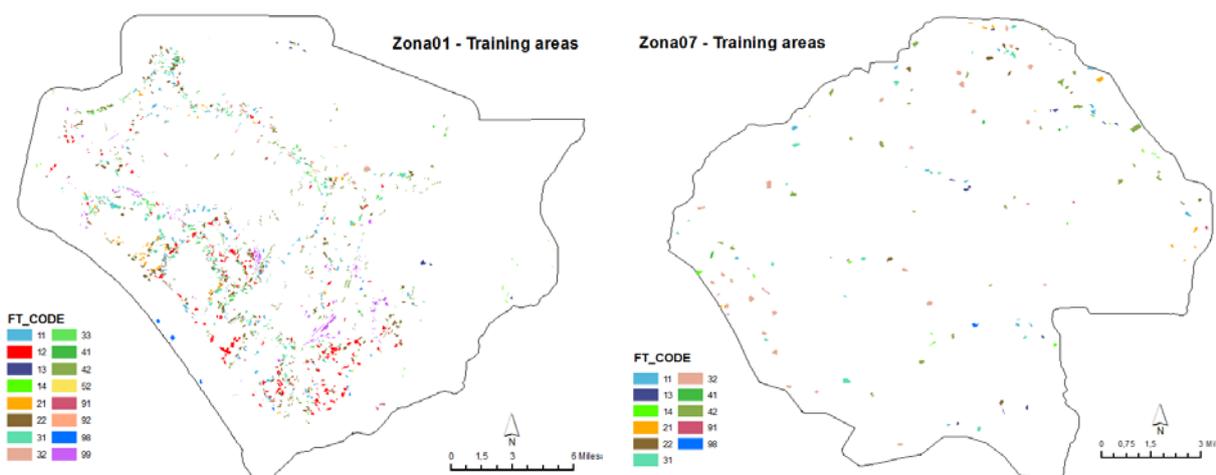


Figura3. Ejemplo de la distribución de las áreas de entrenamiento en algunos sectores del condado de San Diego

#### A.4. Clasificación/revisión experta

El siguiente paso consiste en clasificar cada uno de las teselas obtenidas mediante el uso del OBIA en alguna de las categorías de modelos de combustible a identificar por medio del uso de un clasificador en árbol.

El clasificador en árbol es una técnica de clasificación supervisada (método Classification And Regression Trees (CRT)) destinado al ensayo de distintos algoritmos así como diferentes estrategias de clasificación aplicables a la adquisición de resultados con el uso, en este caso, del software SPSS. Los clasificadores de árbol permiten predecir variables cualitativas (como es el caso de los modelos de combustible) basándose en reglas de decisión a partir de variables (información radiométrica e

información cartográfica empleada en el proceso de clasificación) de entrada, que pueden ser tanto cuantitativas como cualitativas. Se componen de ramas que representan los atributos o variables, y las hojas que representan la decisión final, en este caso el modelo seleccionado. El árbol comienza en el tronco y sigue por las diferentes ramas hasta alcanzar una hoja. Los puntos donde se separa una rama, se denominan nodos, y el último, que define ya las hojas, nodo terminal (Figura 4).

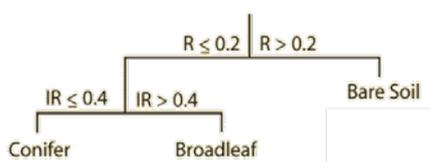


Figura4. Ejemplo simple de un clasificador en árbol

En este proceso de agrupación de las diferentes teselas en algunas de las categorías de modelos de combustibles a identificar, buena parte de los datos que se han ido recopilando fueron introducidos como variables independientes en el análisis estadístico del clasificador en árbol:

- Información espectral perteneciente a las bandas que recogen datos en la región del visible, NIR (Near Infrared) y SWIR (Short Wave Infrared), tanto de las escenas Landsat 8 como de la NAIP-CIR.
- NDVI
- Datos de orientación, pendientes y elevaciones

La puesta en práctica de los clasificadores en árbol conlleva la selección de un algoritmo de clasificación previo. En base a las experiencias del equipo en todos los trabajos en los que ha empleado SPSS, se elige el método Classification And Regression Trees (CRT), es decir árboles de clasificación y regresión. Se trata de un método recurrente de partición que va construyendo árboles dicotómicos en función del valor de una variable en cada nodo; este crece en profundidad hasta que la homogeneidad de los nodos se maximiza, definiéndose ahora sí todos los nodos terminales. Los métodos de árbol requieren una interacción elevada del experto analista, lo que al mismo tiempo permite un análisis muy detallado y una identificación de nodos de asignación menos fiables de lo esperado.

Como garante de la buena calidad del método, se aplica una validación cruzada con la que se evalúa la predicción del análisis estadístico una vez generaliza más allá de la verdad terreno a cada modelo de combustible.

El clasificador en árbol utilizado generó unos resultados de alta precisión (por encima del 96%) con unos valores de validación cruzada muy buenos, mostrándose los mayores conflictos entre tipos de combustibles con comportamientos muy parecidos pertenecientes a una misma categoría (por ejemplo, matorral), donde las dificultades de diferenciación se acrecientan.

Una vez aplicada la clasificación a la totalidad de las teselas, es necesario llevar a cabo una revisión mediante criterio experto. Así será imprescindible hacer un análisis de los nodos terminales en busca de posibles errores en la asignación de las teselas a alguna de las categorías. Paliar todos estos problemas se hace imprescindible si se quiere obtener un desarrollo cartográfico final de alta precisión (Figura 5).

Classification										
Observed	Predicted									Percent Correct
	11	13	14	22	32	33	42	91	98	
11	10	0	0	0	0	0	0	0	0	100,0%
13	0	18	0	0	2	0	0	0	0	90,0%
14	0	0	24	0	0	0	0	0	0	100,0%
22	0	0	0	12	0	0	0	0	0	100,0%
32	0	0	0	0	11	1	0	0	0	91,7%
33	0	0	0	0	0	22	0	0	0	100,0%
42	0	0	0	0	0	1	11	0	0	91,7%
91	0	0	0	0	0	0	0	17	1	94,4%
98	0	0	0	0	0	0	0	0	11	100,0%
Overall Percentage	7,1%	12,8%	17,0%	8,5%	9,2%	17,0%	7,8%	12,1%	8,5%	96,5%

Growing Method: CRT  
Dependent Variable: ft\_code

Figura5. Matriz de clasificación obtenida en el análisis estadístico del condado de San Diego

## B. Dinamismo fenológico de la vegetación

Conocer el dinamismo fenológico de la vegetación permite apoyar el cálculo y la estimación de los modelos de combustible dinámicos. El término dinámico se utiliza para reflejar cómo las características de los combustibles estáticos se pueden ajustar mediante el cálculo de las humedades de combustible, pues las humedades de combustible son un factor crítico para determinar cómo se comportarán los combustibles en condiciones climáticas específicas.

Conocer el comportamiento fenológico de cada modelo de combustible existente en San Diego es extremadamente importante pues el análisis de la dinámica con la que evoluciona la vegetación permite identificar momentos de alto riesgo de quema en áreas donde las condiciones vegetales son malas con, por ende, una predisposición ante la quema óptima.

Una forma fácil y precisa de estudiar esta dinámica vegetal la encontramos en el manejo y análisis de diferentes índices de vegetación. Mucho se ha escrito a este respecto en la literatura científica y, de la gran variedad de índices vegetales disponibles, solamente unos pocos permiten estudiar este dinamismo con detalle, entre los que destaca el NDVI como el índice que ofrece los mejores resultados.

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): cociente o índice de vegetación normalizado más utilizado en la discriminación de los usos del suelo, que utiliza información del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (R). Es un índice utilizado profusamente para estimar diversos parámetros de la cubierta vegetal lo que le confiere un papel protagonista de cara a la evaluación ambiental.

La consecución de este análisis basado, pues, en el estudio del NDVI requiere de la selección de unas fuentes de información adecuadas y del obligatorio cumplimiento de los siguientes pasos.

### B.1. Adquisición de los datos

Las escenas MODIS son las imágenes satelitales escogidas como base en el proceso de extracción de información espectral y desarrollo de un coherente análisis fenológico en el condado de San Diego.

En este sentido, dos han sido las fuentes de datos MODIS seleccionadas en este análisis:

- Escenas del producto MODIS MOD09Q1 (from USGS earthexplorer), las cuales ofrecen información espectral en la región del rojo y del infrarrojo cercano cada 8 días a 250 metros de resolución espacial.
- Datos derivados del sensor MODIS con información sobre el inicio y final del periodo de desarrollo vegetal en cada pixel existente dentro del condado de San Diego.

En ambos casos, el periodo de análisis consultado oscila entre el año 2000 y 2014, es decir, catorce años de información espectral continua que ayudan a darle solidez al análisis estadístico.

## B.2. Procesado y preparación de los resultados

Una vez adquirida la información base con la que trabajar, se ponen en marcha los diferentes procesos cartográficos y de análisis SIG destinados al cálculo de las diferentes estadísticas del dinamismo vegetal.

Catorce ciclos anuales de comportamiento del NDVI han sido analizados, ofreciendo información histórica del dinamismo vegetal de forma anual, aunque también de forma mensual y diaria, tanto de su comportamiento medio como de los diferentes umbrales de oscilación (positivos y negativos) en los que se mueve el comportamiento de la vegetación.

Los datos resultantes de estos procesos son tratados y depurados de forma que se puedan analizar los mismos, fácil y satisfactoriamente, en diferentes gráficos lineales donde se plasma la tendencia media anual así como los umbrales de estrés vegetal de la dinámica fenológica en cada uno de los grandes grupos de modelos de combustibles identificados.

## **C. Análisis del impacto de los incendios**

Conocer el comportamiento del terreno tras un incendio, su regeneración y los grados de afectación que su acción tiene en las diferentes zonas de estudio (en lo que a severidad de daño se refiere) es un paso crucial y necesario a la hora de preparar la capa definitiva de modelos de combustible.

San Diego es un condado que se quema con bastante frecuencia a lo largo del año. Tanto es así que desde 1910 este territorio se ha visto afectado por más de 1400 focos de ignición. Estos incendios alteran la estructura de la vegetación, su distribución en el terreno así como sus cargas de combustibles. Analizar y reflexiones sobre sus efectos es un hecho importante, más cuando la cartografía de modelos de combustible tiene fecha de 2012. Esto hace que 58 incendios hayan acaecido en este sector con posterioridad a la fecha cartográfica de referencia. Así pues, dado que es muy importante analizar el efecto del fuego en estas zonas para poder parametrizar la actualización de la carga de los modelos de combustible, se prepara y lleva a cabo un análisis de severidad de quema en el terreno.

### C.1. Análisis de severidad

El análisis de severidad es una técnica de análisis espectral con la que es posible parametrizar los daños en el terreno causados por el fuego. Este se encuentra basado en el Normalized Burn Ratio (NBR): cociente normalizado tipo NDVI, que en este caso utiliza información del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (ROGAN & FRANKLIN, 2001) de escenas Landsat 8 corregidas, previamente, tanto topológica como espectralmente.

De acuerdo con las características de estas escenas satelitales, las bandas utilizadas para el cálculo de este índice serán la banda 5 (ρNIR) y la banda 7 (ρSWIR):

$$NBR = \rho NIR - \rho SWIR / \rho NIR + \rho SW$$

El objetivo fundamental del análisis de severidad es conseguir conocer los cambios acaecidos en el terreno a raíz de un incendio. Teniendo en cuenta esto, para alcanzar un buen resultado en el estudio de la severidad se hace necesario utilizar, mínimo, dos escenas satelitales diferentes: una previa al incendio y una posterior al mismo.

Dicha fórmula del NBR, explicada con anterioridad, se aplica en ambas escenas por separado para calcular, con posterioridad, la diferencia entre ellas:

$$\Delta NBR = NBR \text{ pre-incendio} - NBR \text{ post-incendio}$$

Los resultados que ofrece esta diferencia no pueden ser interpretados libremente. Hay unos comportamientos fijados en la respuesta de este índice y, para poder entender los mismos, se utilizó la tabla de referencia que propone el programa USGS FireMon, donde se clasifican los resultados obtenidos del cálculo de este diferencial en 7 categorías (Tabla 1).

Tabla 1. Categorías de severidad de quema definidas por el programa USGS FireMon

$\Delta NBR$	Grado de severidad
< -0,25	Alta recuperación post incendio
-0,25 a -0,1	Baja recuperación post incendio
-0,1 a 0,1	No quemado
0,1 a 0,27	Incendio de baja severidad
0,27 a 0,44	Incendio de media-baja severidad
0,44 a 0,66	Incendio de media-alta severidad
> 0,66	Incendio de alta severidad

A modo de mejora y con el objetivo de automatizar todo el proceso que se ha expuesto, se genera un pequeño modelo cartográfico con el que se pretende optimizar el cálculo de la severidad post-incendio en las áreas quemadas. Haciendo uso del mismo, se prepara el análisis de severidad de todas las áreas quemadas desde el verano de 2012 en condado de San Diego.

### C.2. Análisis de las variables meteorológicas (netCDF)

Como apoyo conceptual a la hora de analizar y entender las causas de aparición y propagación de los incendios forestales en San Diego, se hace una recopilación y estudio de los principales parámetros meteorológicos que participan e influyen en este proceso:

- Contenido de humedad del combustible muerto a 1h
- Contenido de humedad del combustible muerto a 10h
- Contenido de humedad del combustible muerto a 100h
- Componentes del viento
- Información histórica de temperatura
- Información histórica de la humedad

Con estos datos, y tomando como base de trabajo los perímetros de todos los incendios de San Diego, se prepara un clasificador en árbol con el que se tipifican los incendios acaecidos en el condado en 4 categorías en función de su origen:

- Viento (que son los incendios de mayor envergadura, en especial cuando se dan los vientos de Santa Ana, cuyas rachas de viento son las responsables de los incendios más severos y mortíferos del condado de San Diego)
- Topográfico
- Mixto (entre las anteriores dos categorías)
- Conato (incendios de pequeña envergadura)

#### D. Modelo de reducción del riesgo de incendios forestales

Tras llevar a cabo todos los análisis que se han explicado, lo que implica disponer de una cartografía sólida de modelos de combustible junto con otros análisis derivados de la misma (sin olvidar las bases cartográficas y fuentes de datos adquiridos a lo largo del desarrollo de los diferentes análisis, se hace imprescindible evaluar, desde una visión algo más amplia, los efectos que provocan los incendios forestales en el terreno.

Para ello se desarrolla un modelo científico de reducción del riesgo de incendios forestales (WRRM, Wildfires Risk Reduction Model) el cual busca ofrecer información que sirva de apoyo en la gestión de los efectos que conllevan focos de ignición así como poder evaluar y priorizar acciones de lucha contra los incendios forestales de forma que se reduzca o elimine su potencial de aparición, tal y como ya se ha indicado.

Para ello, el listado de datos y factores de riesgo que se incorporan en el modelo es muy amplio:

- datos sobre vegetación y combustibles
- datos meteorológicos y predictivos
- ocurrencia de incendios históricos
- historial de interrupciones del suministro eléctrico
- fallos en los equipos (datos del RIRAT y FIRMA),
- análisis del comportamiento del fuego
- modelado de simulación de incendios
- los activos de la red de distribución eléctrica de SDG & E
- condiciones y características del sistema eléctrico
- parámetros subjetivos considerados "valores en riesgo"
- proyectos de reducción de riesgos.

La elaboración de este modelo implica un gran esfuerzo, tanto en personal como en tiempo de dedicación. Se trata de un desarrollo complejo, cuya metodología es amplia pero esta puede quedar plasmada y resumida a continuación de la siguiente forma, detallándose y explicándose la misma en diferentes fases de actuación:

- Diseño del Modelo de Reducción del Riesgo de Incendios Forestales (WRRM), donde se fijan los diferentes requisitos, parámetros y estructura principal del diseño del modelo de modo que fuese robusto.
- Desarrollo de bases de datos: se centra en la compilación de los datos de entrada requeridos por el modelo y en el desarrollo de una base de datos para uso por el WRRM.
- Desarrollo de modelos de software: se centra en el desarrollo real de los submodelos que componen el Modelo de Reducción del Riesgo de Incendios Forestales (WRRM) (Figura 6).
  - Submodelo de ignición, desde el que se considera al equipo de transmisión y distribución eléctrica como la única fuente de ignición.

- Submodelo de vulnerabilidad, que se refiere a la exposición y susceptibilidad de los “valores en riesgo”, tales como estructuras / hogares, instalaciones críticas, madera o áreas ambientalmente sensibles entre otras.
- Submodelo de crecimiento del potencial del fuego: es una función de las condiciones del fuego (combustible, variables del terreno y condiciones meteorológicas) en la zona de quema que rodea al punto de ignición
- Desarrollo de pruebas de software y preparación de las salidas de escenario: implica el desarrollo de un plan de pruebas completas de software así como la producción de salidas basadas en escenarios.
- Documentación e instalación: incluye el desarrollo del manual del usuario así como del manual de administración del software



Figura 6. Submodelos del modelo de reducción del riesgo de incendio (WRRM)

La consecución de este modelo ofrecerá tres salidas clave asociadas a cada activo de SDG&E:

- Impacto condicional
- Impacto esperado
- Reducción del riesgo

#### 4. Resultados

Todos y cada uno de los análisis realizados generan unos resultados finales claros. A continuación se detallan los obtenidos en cada uno de los estudios metodológicamente descritos con anterioridad.

##### A. Preparación de una cartografía de modelos de combustibles

Tras ejecutar los diferentes pasos, procesos y análisis pertenecientes a esta tarea, se elabora la cartografía final de modelos de combustible en base a la metodología de SCOTT & BURGAN (2005), tanto en formato vectorial como raster (se extraen dos raster a diferentes resolución espacial: a 7,6 metros de tamaño de pixel el más detallado y a 21,9 metros de tamaño de pixel el menos detallado) (Figura 7).

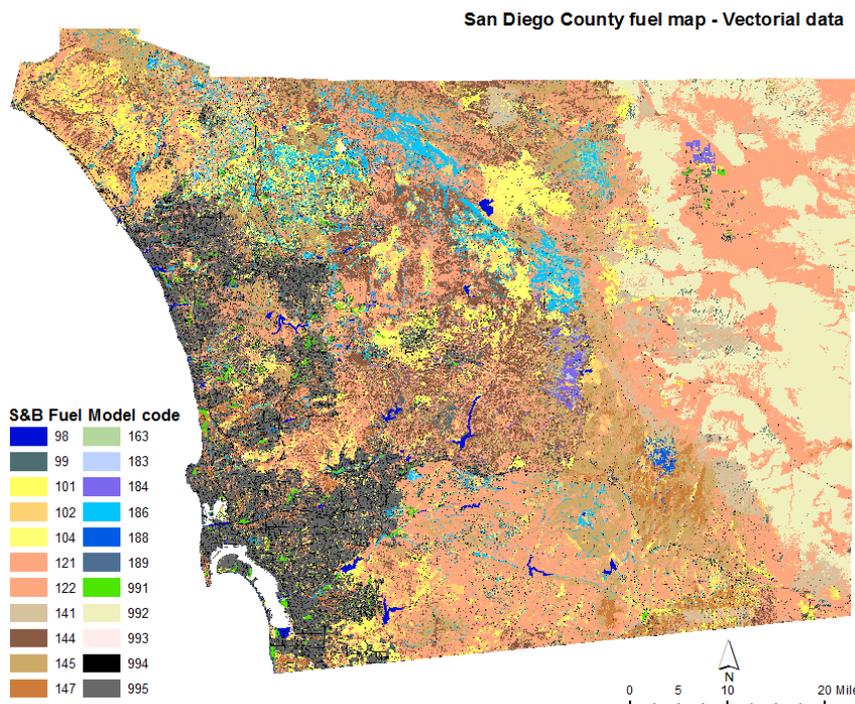


Figura 7. Cartografía de modelos de combustible de la familia de Scott & Burgan en el condado de San Diego

**B. Dinamismo fenológico de la vegetación**

Derivado del análisis completo de los catorce ciclos anuales de NDVI en cada modelo de combustible, se extraen curvas de comportamiento histórico medio del NDVI así como umbrales de estrés vegetal sobre los que poder comparar los datos particulares de un determinado mes o de un determinado año (Figura 8).

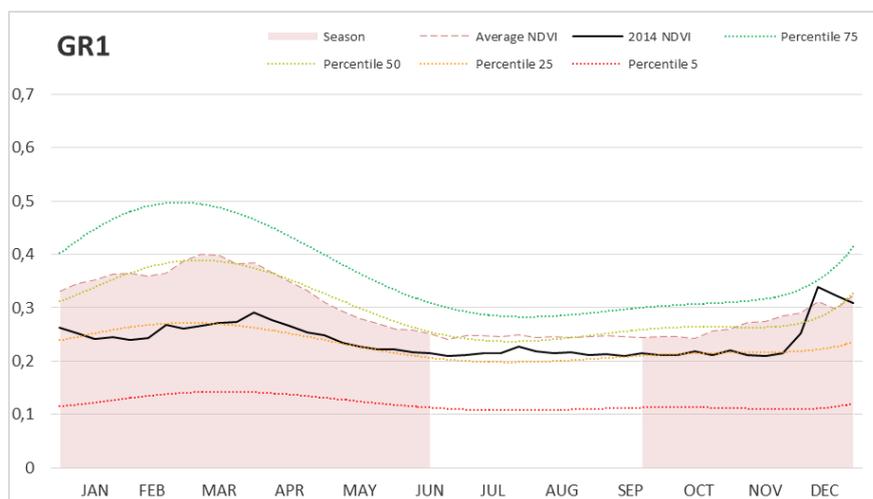


Figura 8. Análisis de la curva de comportamiento del NDVI en el combustible GR1 durante el año 2014 en comparación con el comportamiento fenológico medio histórico

**C. Análisis del impacto de los incendios**

La aplicación del análisis de severidad en todos y cada uno de los incendios acaecidos en San Diego tras el verano de 2012, permite obtener una cartografía del daño de quema en el terreno sobre el que poder analizar y parametrizar comportamiento futuros de recuperación. Además, el análisis de las condiciones meteorológicas existentes en cada uno de estos incendios, tanto en su momento de inicio como en el periodo de propagación, permite caracterizar su tipología de origen y reflexionar sobre el alcance de sus daños y las posibles formas de resolverlos (Figura 9, Figura 10, Figura 11).

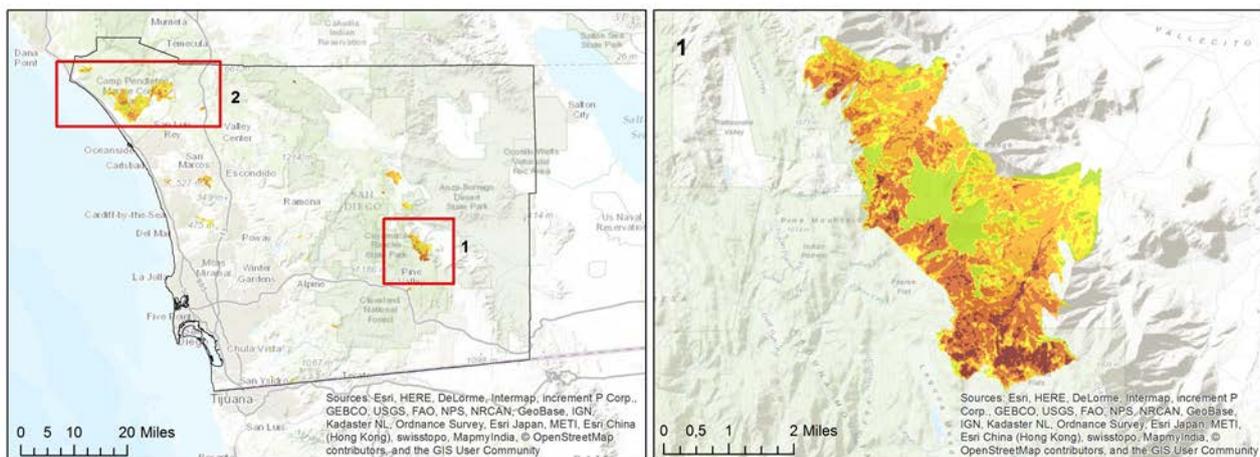


Figura 9. Resultados detallados del análisis de severidad en algunos sectores del condado de San Diego

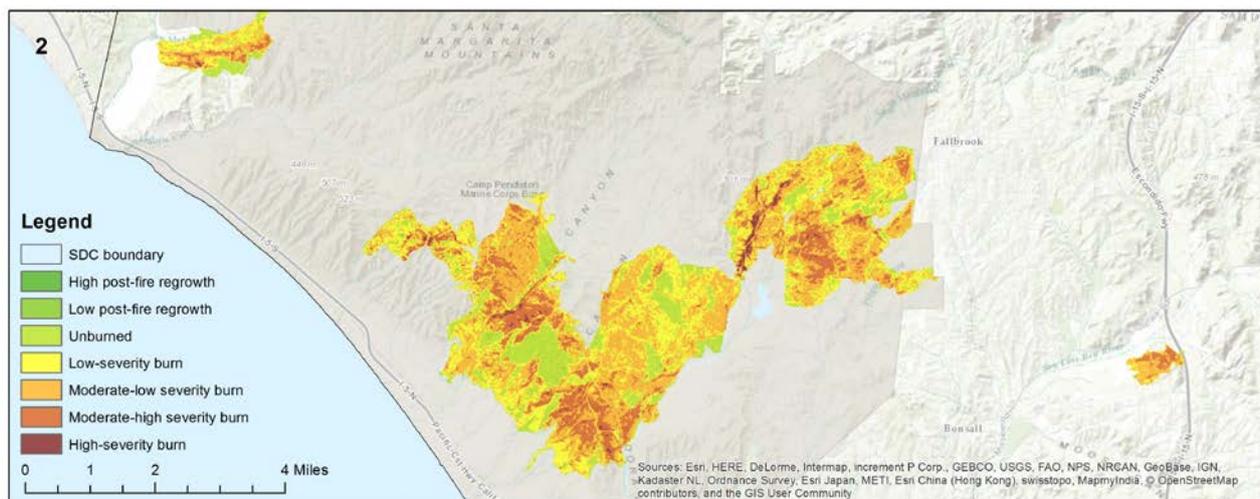


Figura 10. Resultados detallados del análisis de severidad en algunos sectores del condado de San Diego

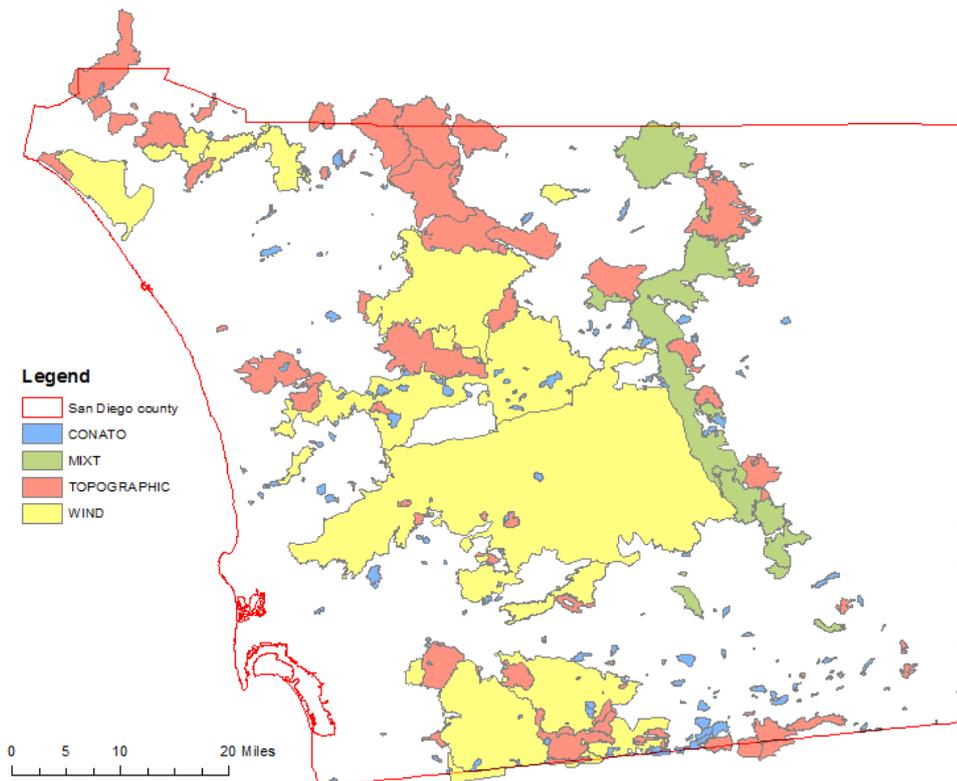


Figura 11. Clasificación de los incendios acaecidos en San Diego desde 1910

#### D. Modelo de reducción del riesgo de incendios forestales

El resultado del modelo proporciona una clasificación relativa del riesgo actual, así como el porcentaje esperado y absoluto de la reducción del riesgo de incendio después de la finalización individual del proyecto endurecido.

La consecución de este modelo ofrecerá tres salidas clave asociadas a cada activo de SDG&E (Figura 12):

- Impacto condicional
- Impacto esperado
- Reducción del riesgo

Baseline Risk								Replacement Risk			
Asset Class	Asset Type	Asset Age	Asset Subtype	Current Relative Failure Rate	Conditional Impact	Expected Annual Impact	Current Ignition Rate	Replacement Asset	Replacement Relative Failure Rate	Replacement Expected Impact	20 Year Risk Reduction
602130	CONDUCTOR	Unknown age	#4 Cu strand	0.178	446,453	34	0.00007521	611130	0.124	23	203
602130	CONDUCTOR	Unknown age	#4 Cu strand	0.178	732,149	55	0.00007521	611130	0.124	38	334
612130	CONDUCTOR	< 30 years old	#4 Cu strand	0.139	650,496	38	0.00005873	611130	0.124	34	82

Figura12. Ejemplo de los campos de salida para un activo individual en el modelo de reducción del riesgo de incendios forestales

Estas salidas se ofrecerán no solo en formato tabla sino también en formato cartográfico (mapa) de forma individual para cada una de las tres salidas clave. Además se elaboran tablas resumen de las estadísticas de riesgo para cada activo (Figura 13).

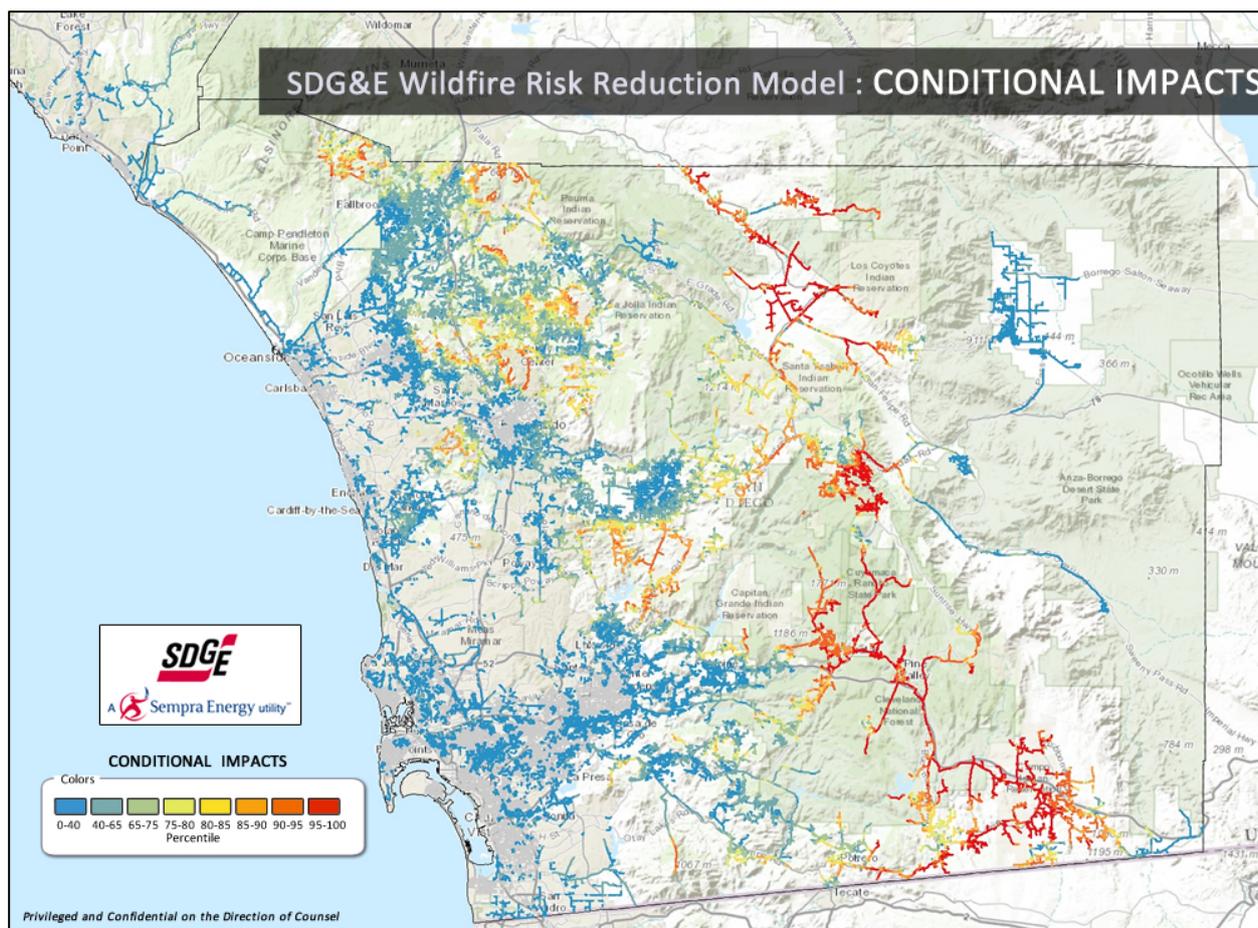


Figura13. Mapa de impactos condicionales del modelo de reducción del riesgo de incendios forestales en San Diego

En resumen, este modelo busca cumplir con los siguientes fines:

- Desarrollar un modelo que integre los principales factores de riesgo de incendios forestales para cuantificar el riesgo de los activos
- Cuantificar la cantidad de reducción de riesgo esperada para proyectos individuales de endurecimiento de las pautas de actuación contra peligro de incendios
- Apoyar al personal de SDG & E con clasificación y priorización de proyectos de mitigación

## 5. Discusión

La ejecución de este proyecto, muestra una deficiencia existente hasta el momento actual en los medios cartográficos así como en el desarrollo de modelos estadísticos-científicos de predicción y parametrización del control del riesgo de incendios, lo que reafirma que la necesidad de mejorar la base conceptual sobre la que luchar contra una de las principales lacras forestales del sur de California era muy alta.

La consecución de las diferentes tareas de este estudio permiten solventar esta escasez de información gracias a la definición de una base cartográfica detallada de los modelos de combustible existentes en el condado de San Diego sobre la que dirigir los diferentes análisis con los que poder luchar en la reducción y control de los incendios de origen eléctrico en el sur de California.

## 6. Conclusiones

Con este proyecto se consigue el objetivo principal definido y fijado de prevenir, reducir y gestionar de forma eficiente el riesgo de incendios forestales provocados por incidencias de naturaleza eléctrica en los territorios del sur de California (Condado de San Diego), así como evaluar sus principales impactos.

El uso de las fuentes de información disponibles y el análisis detallado y preciso de la información estadística que se extrae de los diferentes estudios y análisis realizados, pone de manifiesto que sí se puede llevar a cabo un control y revisión óptimo de todos los parámetros y condiciones inestables que influyen en la aparición y propagación de los incendios forestales para, poco a poco, reducir sus impactos y minimizar las repercusiones que éstos generan en todos los ámbitos.

## 7. Bibliografía

BLASCHKE, T.; 2010. Object based image analysis for remote sensing, *SPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 65, 2-16

CHAVEZ, P.S.; KWARTENG, A.; 1989. Extracting spectral contrast in Landsar Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 55, 339-348

CHUVIECO, E.; 2002. Teledetección ambiental. Ediciones Ariel. 586. Barcelona

HANES, T.L.; 1988. California Chaparral. En: BARBOUR, M.G.; MAJOR, J.; (eds.) *Terrestrial Vegetation of California*. 417-470. California Native Plant Society, Spec. Publ 9. Davis Sacramento

MATHER, P.M.; 1998. *Computer Procesing of Remotely Sensed Images*. Chichester, John Wiley & Sons

ROGAN, J.; FRANKLIN, J.; 2001. Mapping wildfire burn severity in Southern California forests and shrublands using enhanced thematic mapper imagery. *Geocarto International*, 16(4), 91-106

SCOTT, J.H.; BURGAN, R. E.; 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Department of Agriculture, Forest Service. 72. Rocky Mountain Research Station

USGS (2013) Remote Sensing Phenology. <http://phenology.cr.usgs.gov/>