

Decisión multicriterio y estocástica aplicada a incendios forestales.

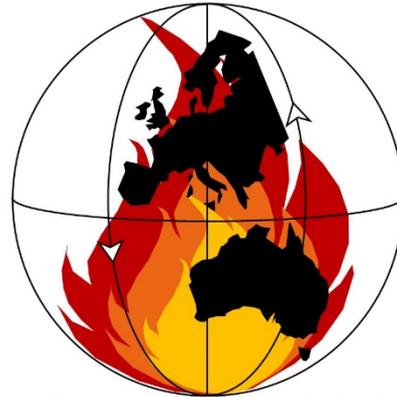
Javier León^a, Begoña Vitoriano^a, John Hearne^b.

^aUniversidad Complutense de Madrid

^bRoyal Melbourne Institute of Technology (RMIT) University (Australia).

Abstract: Existen en la literatura numerosos modelos de investigación operativa cuyos objetivos son la prevención y/o preparación para mitigar los efectos de incendios forestales. Estos modelos buscan ayudar a los responsables a la hora de tomar decisiones tales como dónde efectuar quemas controladas o la localización de recursos entre otras. Sin embargo, hay poco hecho acerca de cómo utilizar los recursos disponibles en el ataque inicial del fuego, o incluso donde localizarlos con antelación, en la fase de preparación. La mayor parte de estos modelos consideran diferentes criterios, pero que no son tratados explícitamente sino introduciendo en las restricciones límites al valor de éstos (por ejemplo, no sobrepasando un presupuesto o alcanzando cierto valor en alguna métrica medioambiental). En este trabajo sugerimos nuevas formulaciones de modelos de programación matemática que consideren conjuntamente estocasticidad y múltiples criterios. Se presentarán estos modelos, así como el planteamiento para definir el método que se utilizará para buscar soluciones de los mismos, satisfaciendo los requisitos de los decisores.

Palabras Clave: Incendios forestales; Respuesta temprana; Optimización Estocástica; Toma de decisión multicriterio.



GEO-SAFE



Decisión multicriterio y estocástica aplicada a incendios forestales

Javier León, Begoña Vitoriano, John Hearne
Universidad Complutense de Madrid, RMIT Melbourne

XI Reunión del Grupo Español de Decisión Multicriterio
16 de Junio 2017, Málaga, España





Contenidos



- Matemáticas en la lucha contra incendios forestales
 - Simuladores
 - Modelos de ayuda a la decisión
- Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios
- Conclusiones y trabajo futuro



Matemáticas en la lucha contra incendios forestales: simuladores



- Modelos matemáticos en lucha contra incendios forestales (*prevención, mitigación, respuesta, recuperación*) ¹:
 - creación de mapas de riesgo
 - diseño de cortafuegos
 - diseño de políticas de repoblación forestal
 - reconocimiento de imágenes
 - apoyo a los equipos de extinción (propagación)
- *Simuladores de propagación del fuego*: lo más desarrollado
 - *Inicio años 70*: Modelos pioneros, basados en fórmulas empíricas para predecir velocidad avance de frente de fuego
 - Más manejables que los basados en leyes físicas
 - Aún se utilizan: relativamente sencillos, rápidos. Poco precisos
 - *Avances en computación y métodos numéricos* → Resolución ecuaciones obtenidas de leyes físicas (sistemas EDPs)
 - Más precisos, pero todavía faltan fenómenos físicos (convección)
 - Lentos, poco flexibles (cambios meteorológicos) y mucha información

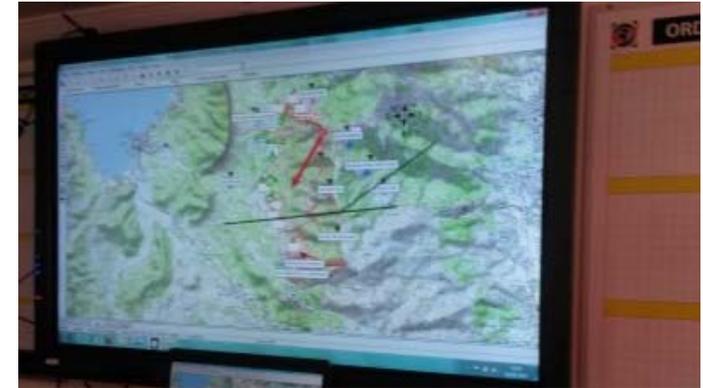
¹ Luis Ferragut (Univ. Salamanca) http://elpais.com/elpais/2016/09/13/ciencia/1473757947_6055911.html



Matemáticas en la lucha contra incendios forestales: modelos de ayuda a la decisión



- Muchos modelos de propagación
- Pocos modelos para toma de decisiones
- Muy pocos para **extinción del incendio**:
 - Area and perimeter of fire calculated with FARSITE, decides where to attack fire. Minimizes Cost + Net Value Change
 - Donovan, G. H., & Rideout, D. (2003). An integer programming model to optimize resource allocation for wildfire containment. *Forest Science*, 49
 - Stochastic model (allowing reallocation of resources) calculating area and perimeter with DEVS-FIRE and minimizing C+NVC
 - Hu, X., & Ntaimo, L. (2009). Integrated simulation and optimization for wildfire containment. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 19
 - Resource allocation for escaped fires (~ team orienteering problem with time windows)
 - van der Merwe, M., Minas, J. P., Ozlen, M., & Hearne, J. W. (2015). A mixed integer programming approach for asset protection during escaped wildfires. *Canadian Journal of Forest Research*, 45



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

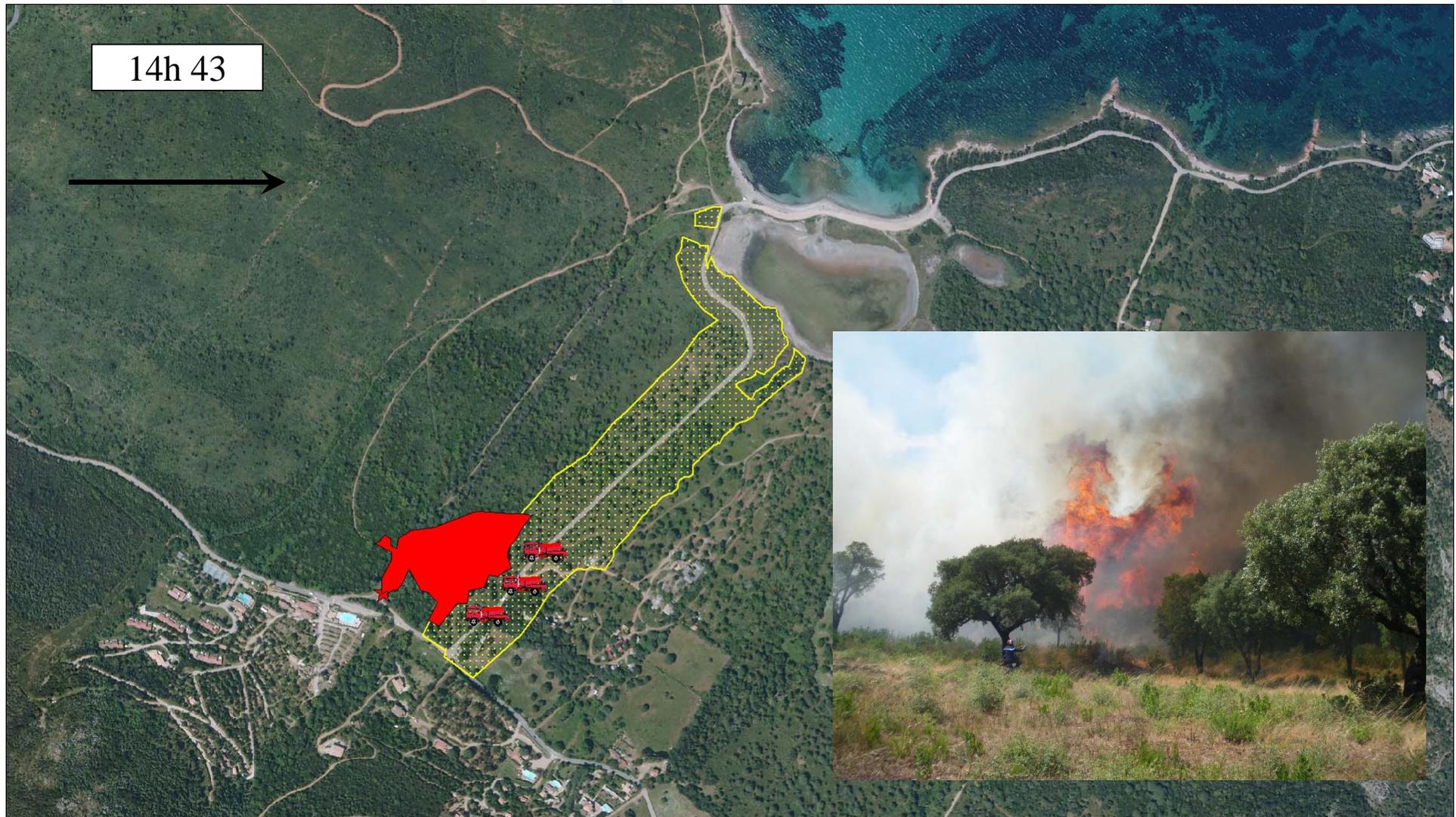
CONSEIL GENERAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

CONSEIL GÉNÉRAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

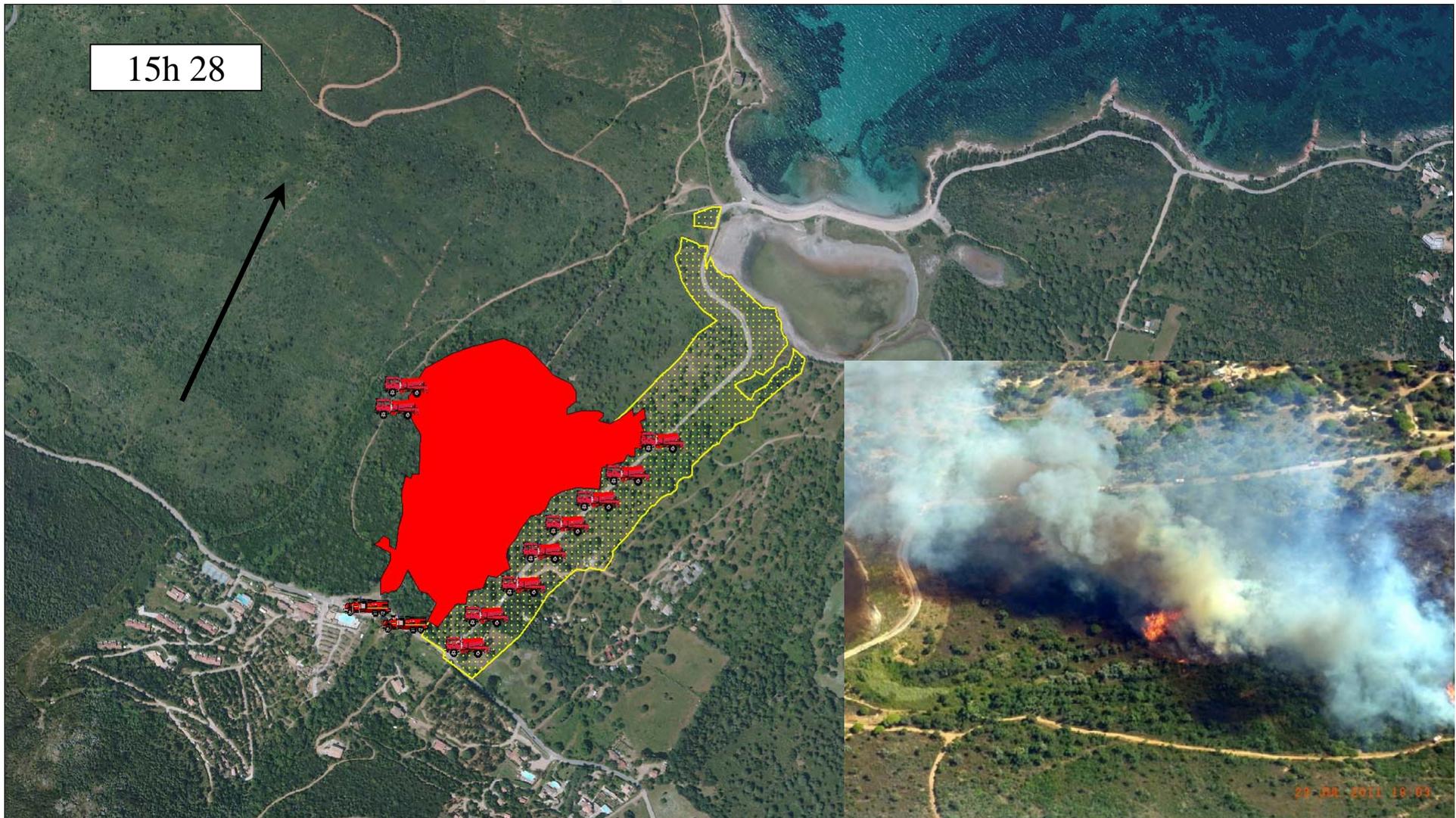
CONSEIL GENERAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

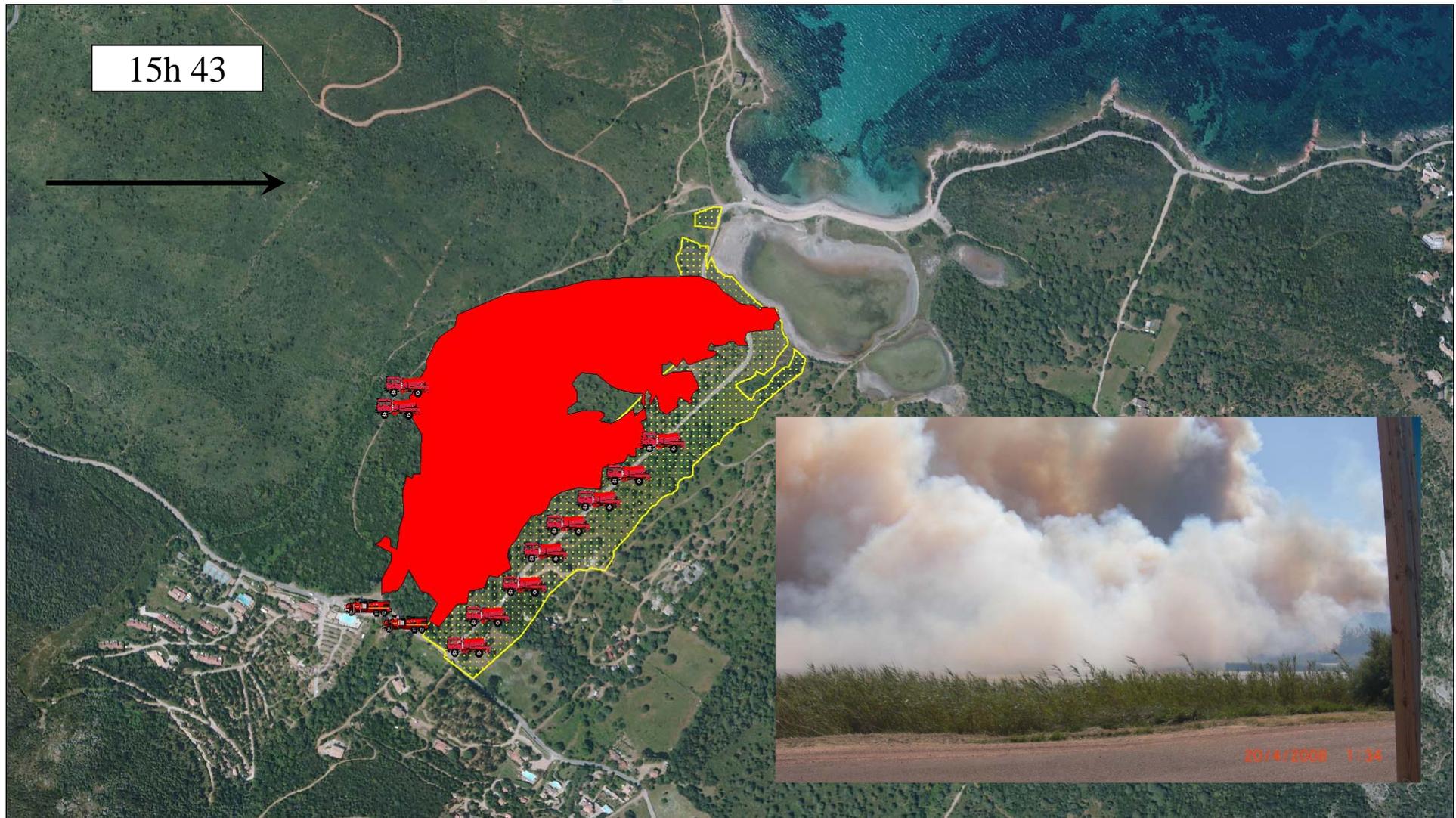


Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

CONSEIL GÉNÉRAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs

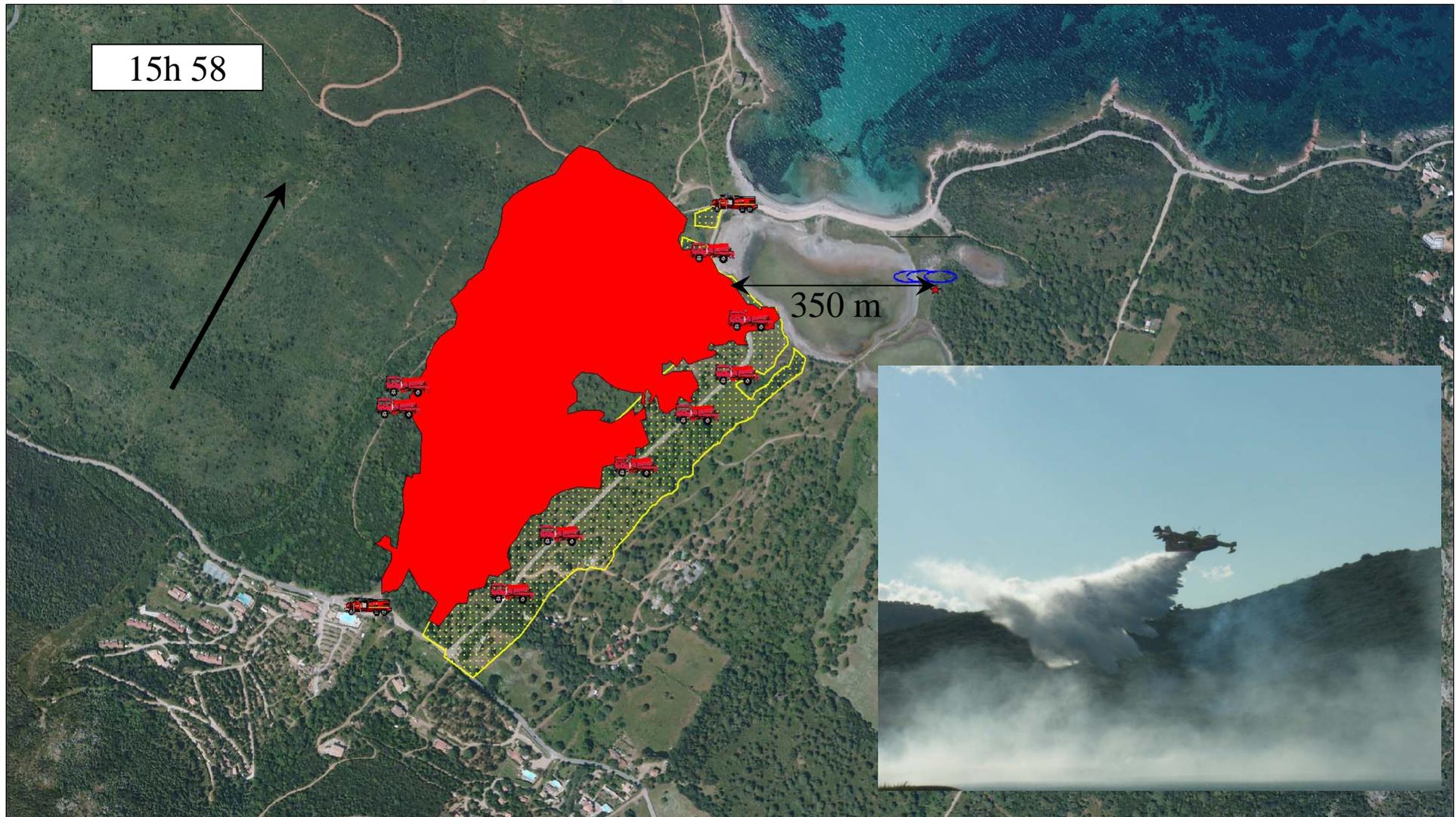


Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

CONSEIL GENERAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs

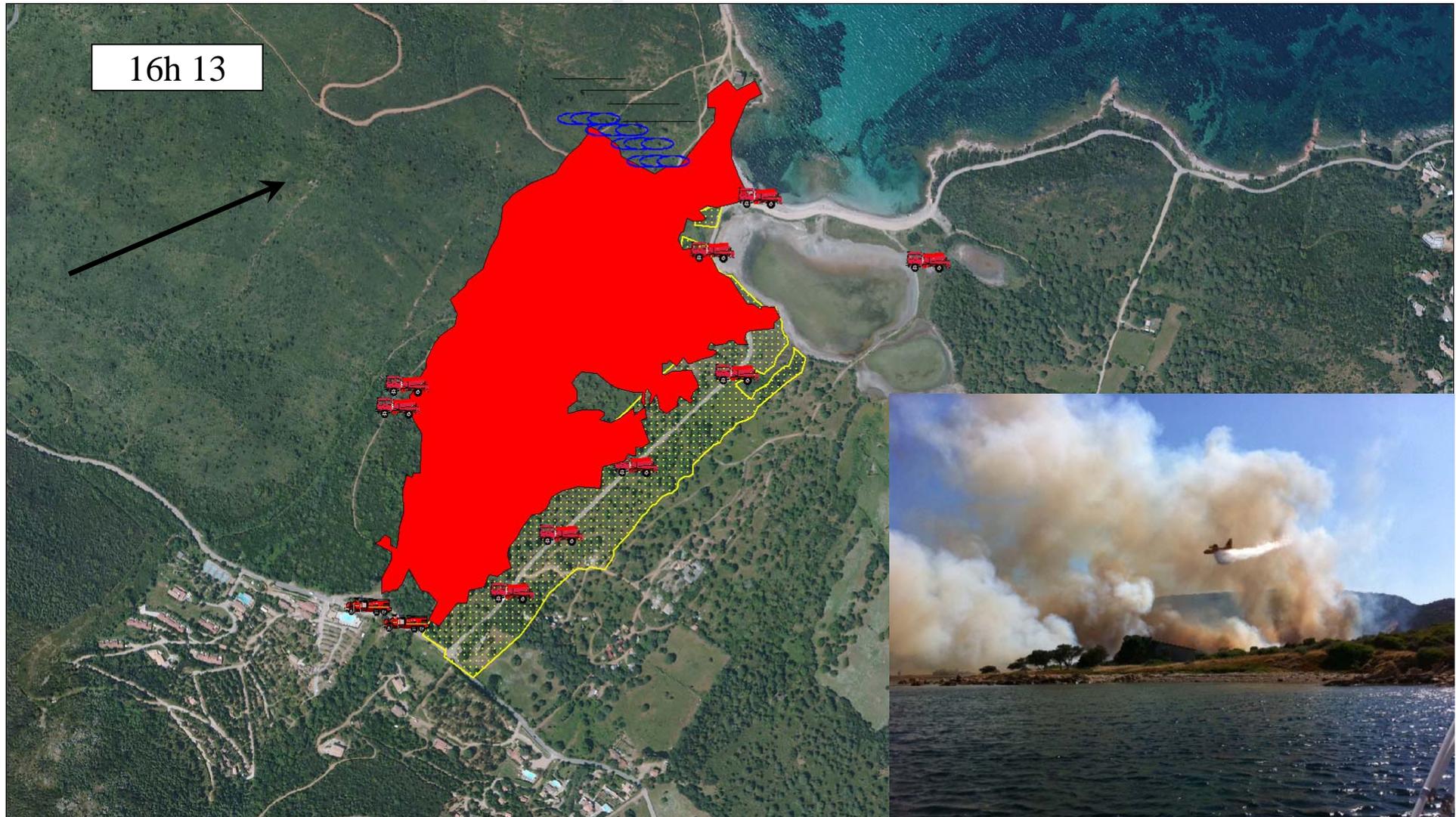


Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

CONSEIL GENERAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

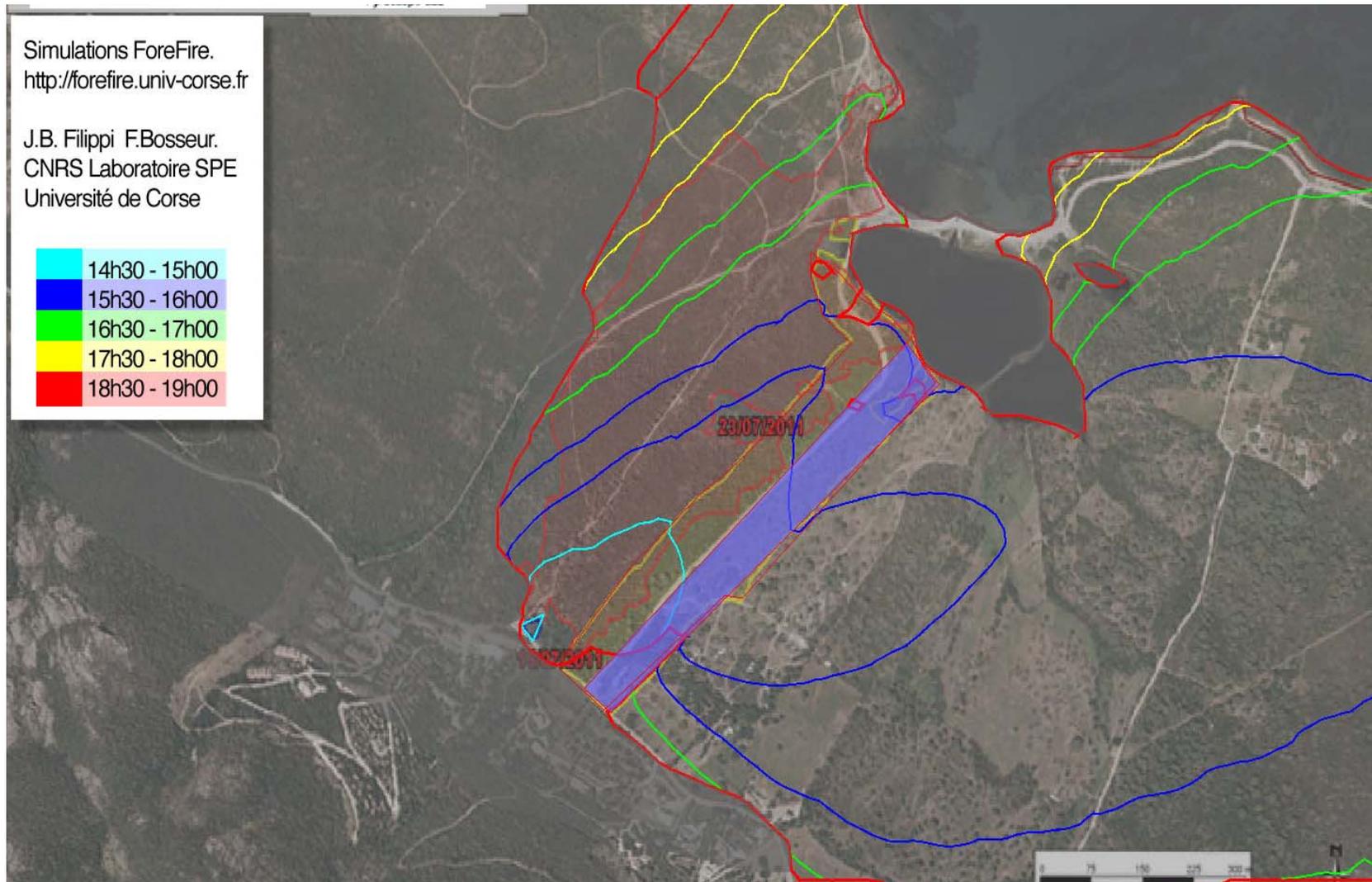
CONSEIL GÉNÉRAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs



Simulations ForeFire.
<http://forefire.univ-corse.fr>

J.B. Filippi F.Bosseur.
CNRS Laboratoire SPE
Université de Corse

14h30 - 15h00
15h30 - 16h00
16h30 - 17h00
17h30 - 18h00
18h30 - 19h00



Feu de PICCOVAGGIA du 23 juillet 2011



Direction Départementale des Territoires
et de la Mer de Corse-du-Sud

CONSEIL GÉNÉRAL
CORSE DU SUD
Forestiers Sapeurs



Zona protegida: 227 ha

Un departamento, un camping (1400 veraneantes)

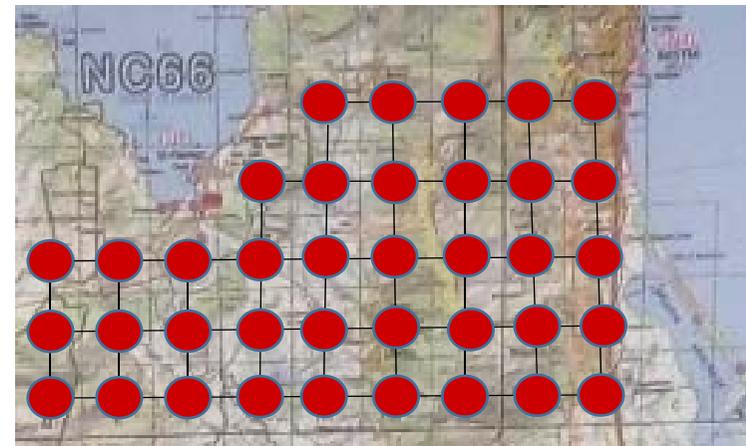
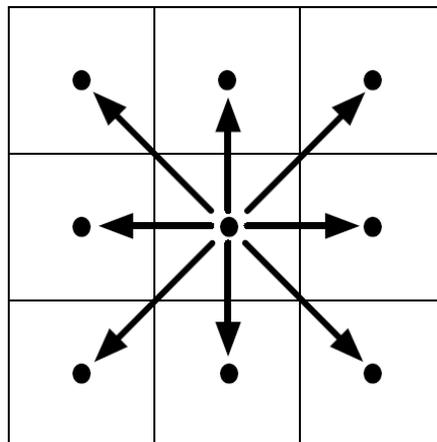




Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



- Belval, E. J., Wei, Y., & Bevers, M. (2015). A mixed integer program to model spatial wildfire behavior and suppression placement decisions. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(4), 384–393
- Modelo **MIP** con **evolución de un incendio forestal**
- Celdas homogéneas en términos de topografía y carga de combustible: velocidad constante de propagación
- En abstracto:



6/20/2017



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



- **Entrada modelo:** propagación calculada con un simulador
 - Propagación es dada como el tiempo en que el fuego sería transmitido de una celda a otra en caso de que la primera arda, y las intensidades.
 - Simulador **FlamMap** (United States Forest Service, USFS). Un único conjunto de condiciones meteorológicas (no componente temporal).
 - Simulador FARSITE (USFS) incluye componente temporal (sin intervención).
- Modelo de programación matemática con decisiones:
 - Decisiones de **Extinción:** *dónde* enviar los equipos y *qué* técnicas usar
 - Decisiones de **Preparación:** *cómo* asignar y ubicar los recursos de extinción, y *dónde/cuándo* hacer quemas controladas o cortafuegos



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



- Parámetros:
 - $\text{ignP}(i)$: binaria, si i es un punto de ignición
 - $\text{ignT}(i)$: instante de ignición en el punto i
 - $\text{ignI}(i)$: intensidad de ignición en el nodo i
 - $\text{nonF}(i)$: binaria, si el nodo i no es inflamable
 - $\text{nonC}(i)$: binaria, si i no puede ser controlado
 - $\text{adj}(i,j)$: binaria, si el fuego puede ir de i a j
 - $\text{st}(i,j)$: tiempo de propagación de i a j
 - $\text{si}(i,j)$: intensidad de propagación del frente en j si el fuego viene de i
 - $\text{thr}(i)$: umbral de intensidad en i (perjudicial o no) ($100\text{Kw/m} \sim 0,65\text{m}$)
 - $\text{timeC}(i)$: instante más temprano en que puede llegarse a controlar i
- Variables:
 - $B(i)$: binaria, si el nodo i arde durante el fuego
 - $C(i)$: binaria, si el nodo i es controlado
 - $P(i,j)$: binaria, si el fuego se propaga de i a j
 - $\text{TF}(i)$: instante en que el fuego llega al nodo i (depende de $C(i)$)
 - $\text{QI}(i)$: intensidad con la que arde el nodo i
 - $H(i)$: binaria, si i arde con intensidad perjudicial (alta intensidad)
 - $G(i)$: binaria, si i arde con intensidad no perjudicial (baja intensidad)



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



- Restricciones:

- $B(i) = 1$ $\forall i / \text{ignP}(i)=1$
- $TF(i) = \text{ignT}(i)$ $\forall i / \text{ignP}(i) = 1$
- $QI(i) = \text{ignI}(i)$ $\forall i / \text{ignP}(i)=1$
- $C(i) = 0$ $\forall i / \text{nonC}(i) = 1$

- $B(i) + C(i) + \text{nonF}(i) \leq 1$ $\forall i$
- $B(i) \leq B(j) + C(j) + \text{nonF}(j)$ $\forall i, j / \text{adj}(i,j)=1$
- $B(i) = \sum_{j/\text{adj}(j,i)=1} P(j,i)$ $\forall i / \text{ignP}(i) = 0$
- $P(i,j) \leq B(i)$ $\forall i,j$
- $TF(j) \leq TF(i) + \text{st}(i,j) + M(1 - B(i))$ $\forall i, j / \text{adj}(i,j)=1$
- $TF(j) \geq TF(i) + \text{st}(i,j) - M(1-P(i,j))$ $\forall i, j / \text{adj}(i,j)=1$
- $QI(i) = \sum_{j/\text{adj}(j,i)=1} s_i(j,i)P(j,i)$ $\forall i / \text{ignP}(i)=0$
- $G(i) + H(i) \leq B(i)$ $\forall i$
- $QI(i) \leq \text{thr}(i) + M(1 + H(i) - B(i))$ $\forall i$
- $QI(i) \geq \text{thr}(i) - M(1 + G(i) - B(i))$ $\forall i$

- $TF(i)+\text{st}(i,j) \geq \text{timeC}(j) (C(j)+B(i)-1)$ $\forall i, j/ \text{adj}(i,j)=1$



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



- Objetivo:
wB, wC, wH, wG: “costes” de las acciones en cada nodo
- Sin considerar fuegos no perjudiciales como beneficio:
Minimizar [coste de extinción + valor de nodos quemados]
$$\min \sum [wC(i) C(i) + wB(i) B(i)]$$
- Incluyendo beneficio de fuegos no perjudiciales:
$$\min \sum [wC(i) C(i) + wH(i) H(i) - wG(i) G(i)]$$
- Resultados: caso de estudio
 - Datos proporcionados por Belval: salida de simulador FlamMap.
 - 11x12 celdas heterogéneas en las Black Hills de Dakota del Sur.
 - Tamaño de las celdas: 30x30m.
 - Tipos de fuel: 102 (carga baja, hierba clima seco), 122 (carga moderada, hierba-arbusto clima seco), 188 (carga alta, pinocha larga).



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



194	190	168	124	123	116	125	142	191	226	285	295
174	137	130	59	48	41	42	98	117		253	288
154	133	122		44	32	25	26	82		208	272
139	126	109		46	23	17	17	65	123	193	262
127	111	88		40	15	8	9	54		235	252
122	105	83	66	33	11	0	5	48		200	191
127	111	88		37	15	8	9	55		137	124
186	168	151		43	29	23	22	49	97	110	109
189	173	164		57	47	36	36	44		95	93
194	185	153	72	66	58	49	49	50		78	85
208	198	177	134	79	64	57	58	62	63	71	79

S	SW	SE	S	S	S	S	SW	S	SW	W	W
S	SE	S	SE	SE	S	SW	W	SW		S	SW
S	E	S		E	SE	S	SW	W		SW	SW
SE	S	S		NE	SE	S	SW	W	SW	W	W
SE	SE	SE		SE	SE	S	SW	W		NW	S
E	E	E	E	E	E		W	W		S	S
NE	NE	NE		E	NE	N	NW	W		SE	S
N	E	N		NE	N	N	NW	SW	W	S	SW
E	NE	N		N	NE	N	NW	W		S	SW
NE	N	E	NE	N	NE	N	NW	NW		SW	SW
NE	N	NE	N	NE	NE	N	NW	NW	NW	W	W



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



				S	S	S	SW	S	SW	W	W
				SE	S	SW	W	SW		S	SW
				E	SE	S	SW	W		SW	SW
				NE	SE	S	SW	W	SW	W	W
				SE	SE	S	SW	W		NW	S
				E	E		W	W		S	S
				E	NE	N	NW	W		SE	S
				NE	N	N	NW	SW	W	S	SW
				N	NE	N	NW	W		S	SW
				N	NE	N	NW	NW		SW	SW
				NE	NE	N	NW	NW	W	W	

$wC/wB = 7.5$

$wC/wB = 5$

				S	S	S	SW	S			
				SE	S	SW	W	SW			
				E	SE	S	SW	W			
				NE	SE	S	SW	W			
				SE	SE	S	SW	W			
				E	E		W	W			
				E	NE	N	NW	W			
				NE	N	N	NW	SW			
				N	NE	N	NW	W			
				N	NE	N	NW	NW			
				NE	NE	N	NW	NW			



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



				S	S	S	SW	S	SW	W	W
				SE	S	SW	W	SW		S	SW
				E	SE	S	SW	W		SW	SW
				NE	SE	S	SW	W	SW	W	W
				SE	SE	S	SW	W		NW	S
				E	E		W	W		S	S
				E	NE	N	NW	W		SE	S
				NE	N	N	NW	SW	W	S	SW
				N	NE	N	NW	W		S	SW
				N	NE	N	NW	NW		SW	SW
				NE	NE	N	NW	NW	W	W	W

$wC/wB = 7.5$

$wC/wB = 10$

S	SW	SE	S	S	S	S	SW	S	SW	W	W
S	SE	S	SE	SE	S	SW	W	SW		S	SW
S	E	S		E	SE	S	SW	W		SW	SW
SE	S	S		NE	SE	S	SW	W	SW	W	W
SE	SE	SE		SE	SE	S	SW	W		NW	S
E	E	E	E	E	E		W	W		S	S
NE	NE	NE		E	NE	N	NW	W		SE	S
N	E	N		NE	N	N	NW	SW	W	S	SW
E	NE	N		N	NE	N	NW	W		S	SW
NE	N	E	NE	N	NE	N	NW	NW		SW	SW
NE	N	NE	N	NE	NE	N	NW	NW	NW	W	W



Un modelo de ayuda a la decisión para extinción de incendios



E	E	E	E	E	SE	SE	S	S	SW		
SE	E	E	NE			S	S	SW		NW	W
E	NE			NW		SE	S			N	NW
NE							S		NE	N	N
S		SE		S			SW			N	N
SE		E	SE	S				NW		N	NW
E	NE			S				N			
NE	N	NW		SE		E	NE	N	NW		SW
	NE	N			E	E	N	N		NW	W
	N	E	E	NE			N	NW		N	NW
	N	E	NE	N	NW				NE	E	NW

Beneficio fuegos de baja intensidad

$$wC/wB = 10$$

S	SW	SE	S	S	S	S	SW	S	SW	W	W
S	SE	S	SE	SE	S	SW	W	SW		S	SW
S	E	S		E	SE	S	SW	W		SW	SW
SE	S	S		NE	SE	S	SW	W	SW	W	W
SE	SE	SE		SE	SE	S	SW	W		NW	S
E	E	E	E	E	E		W	W		S	S
NE	NE	NE		E	NE	N	NW	W		SE	S
N	E	N		NE	N	N	NW	SW	W	S	SW
E	NE	N		N	NE	N	NW	W		S	SW
NE	N	E	NE	N	NE	N	NW	NW		SW	SW
NE	N	NE	N	NE	NE	N	NW	NW	NW	W	W



Conclusiones y trabajo futuro



- Basado en un simulador que refleje la evolución del fuego, es posible desarrollar **modelos para ayudar a tomar decisiones** durante la extinción del fuego.
- Se han hecho modificaciones a un **modelo** previo para que sea más realista y más rápida la resolución.
- El trabajo está en proceso
- **Trabajo futuro:**
 - **Incluir más criterios:**
 - Valor medioambiental (otras medidas y valores)
 - Fiabilidad de las medidas (¿controlar es controlado?)
 - Seguridad de los equipos (incluyendo emisiones de CO)
 - **Incluir incertidumbre:**
 - Condiciones meteorológicas (especialmente viento, cambios)
 - Carga de fuel
 - Precisión del simulador
 - Considerar decisiones discretas: **puntos críticos de control**



Acknowledgements



The GEO-SAFE project has received funding from the European Union's Horizon 2020 RISE programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No. 691161. The project reflects only the authors view and the EC is not responsible for any use that may be made of the information it contains.

