



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DE PATRONES ESPACIALES DE CORTAFUEGOS PARA PREVENIR
INCENDIOS FORESTALES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
GESTIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS

MAXIMILIANO ANDRÉS MARTINEZ SAAVEDRA

PROFESOR GUÍA:
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

PROFESOR CO-GUÍA:
JAIME CARRASCO BARRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HORACIO GILABERT PERALTA

MIGUEL CASTILLO SOTO

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN Y POLÍTICAS PÚBLICAS
POR: MAXIMILIANO ANDRÉS MARTINEZ SAAVEDRA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE CO-GUÍA: JAIME CARRASCO BARRA

DISEÑO DE PATRONES ESPACIALES DE CORTAFUEGOS PARA PREVENIR INCENDIOS FORESTALES

La frecuencia y magnitud de los incendios forestales ha incrementado a lo largo del tiempo, principalmente por el impacto del cambio climático y el descuido descontrolado de los seres humanos. Gobiernos, empresas y otras instituciones se han visto en la obligación de incorporar este impacto en la política forestal y la planificación territorial, priorizando un enfoque preventivo para minimizar los daños de estos eventos desastrosos para la naturaleza y la humanidad. Los expertos indican que las comunidades que se encuentran en la interfaz urbano rural pueden planificar el uso de la tierra y las normas de las construcciones aledañas para ayudar a disminuir estos efectos, es decir, con la tecnología actual es posible construir paisajes resilientes a los incendios forestales. Algunas de las técnicas para esto es la silvicultura preventiva o *forest fuel management* la cual permite disminuir el efecto incontrolado de los incendios a través de la modificación del combustible forestal y/o construcción de cortafuegos.

Para el trabajo de esta tesis se utilizó el simulador de incendios forestales Cell2Fire. Se construyeron 90 patrones espaciales de cortafuegos en base a 9 figuras unitarias de cortafuegos (formas cóncavas, barras paralelas y rectángulo), 5 porcentajes (1% a 5%) de cortafuegos con respecto al total del bosque y 2 disposiciones espaciales (*Interleaved* y *Aligned*) sobre 4 bosques distintos de 10.000 ha cada uno, también 5 patrones aleatorios para cada uno de los niveles de porcentaje lo que permite tener un punto de comparación. Se simularon incendios forestales considerando una aleatoriedad en los puntos de ignición y la dirección del viento, lo que generó un total de 912.000 incendios forestales simulados. Estas simulaciones fueron realizadas con el propósito de analizar la forma y disposición espacial de los cortafuegos que ayudan a disminuir el crecimiento del incendio.

Luego de las simulaciones realizadas, se encontró que desde un 3% de cortafuegos la configuración aleatoria tiene peor rendimiento que el resto de las configuraciones, aumentando esta diferencia a medida que aumenta el porcentaje de cortafuego; la configuración que logro la mayor disminución de área quemada fue 5x12x5 - 5% - *Interleaved* (ver figura 4.8i) con un promedio de 35.26% menos de área quemada con respecto a la configuración aleatoria 5% (ver figura 4.9e). Esta tendencia se repitió en las configuraciones con figuras cóncavas (5x12x5, Cross, 7x8x7 y Hat) y con una disposición espacial *Interleaved*. Los resultados observados permiten confirmar que tiene sentido pensar en la forma y disposición espacial de los cortafuegos y no dejar al azar esta tarea, volviéndose más beneficioso a medida que aumenta la disponibilidad de cortafuegos dentro de un bosque.

Para futuras investigaciones se sugiere utilizar técnicas como inteligencia artificial o metaheurísticas que permitan posicionar cortafuegos en base a una función objetivo como también restricciones de acuerdo a los terrenos a intervenir. Logrando así avanzar en la creación de una herramienta tecnológica de gestión territorial para la creación de paisajes resilientes a incendios forestales.

Dedicada a Marina, Mauricio y Paulina.

Agradecimientos

Gracias a Andrés Weintraub y Jaime Carrasco por darme la oportunidad de trabajar con ustedes, aprendí muchísimo en el desarrollo de este trabajo. Espero haber aportado con un grano de arena a la gran investigación que llevan adelante.

Gracias a todas las personas que me acompañaron en el transcurso de estos 9 largos años de universidad.

Gracias a ti y a nadie.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos de investigación	5
1.1.1. Objetivo General	5
1.1.2. Objetivos específicos	5
2. Marco Conceptual	6
2.1. Cell2Fire	6
2.2. Estudios de cortafuegos	9
3. Políticas Públicas Forestales en Chile	11
4. Diseño Metodológico	16
4.1. Bosques	16
4.2. Cortafuegos	19
4.3. Puntos de ignición	23
4.4. Clima	24
5. Resultados y Análisis	26
5.1. Rendimiento configuración aleatoria	26
5.2. Configuraciones con menor promedio de celdas quemadas	27
5.3. Influencia de la figura y diseño de la configuración	28
5.4. Influencia del porcentaje total de cortafuegos	32
6. Discusión	34
7. Conclusión	38
Bibliografía	43
Anexos	44
A. Configuraciones de cortafuegos	45

B. Resultados simulaciones	56
B.1. Heterogeneous NF	57
B.2. Heterogeneous C1	62
B.3. Heterogeneous O1b	67
B.4. Homogeneous C1	72
C. Gráfico promedio de celdas quemadas vs porcentaje de cortafuego	77

Índice de Tablas

4.1.	Frequency of fuel type in Heterogeneous NF forest.	17
4.2.	Frequency of fuel type in Heterogeneous C1 forest.	17
4.3.	Frequency of fuel type in Heterogeneous O1b forest.	18
4.4.	Frequency of fuel type in Homogeneous C1 forest.	18
5.1.	Random configuration rank out of 19 configurations	27
5.2.	The best fuelbreak configuration and percentage variation with respect to random configuration per scenario	28
B.1.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 1 %. In green, Random - 1 % - Random configuration	57
B.2.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 2 %. In green, Random - 2 % - Random configuration	58
B.3.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 3 %. In green, Random - 3 % - Random configuration	59
B.4.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 4 %. In green, Random - 4 % - Random configuration	60
B.5.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks in Heterogeneous NF forest - 5 %. In green, Random - 5 % - Random configuration	61
B.6.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest- 1 %. In green, Random - 1 % - Random configuration	62
B.7.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 2 %. In green, Random - 2 % - Random configuration	63
B.8.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 3 %. In green, Random - 3 % - Random configuration	64
B.9.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 4 %. In green, Random - 4 % - Random configuration	65
B.10.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 5 %. In green, Random - 5 % - Random configuration	66
B.11.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 1 %. In green, Random - 1 % - Random configuration	67
B.12.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 2 %. In green, Random - 2 % - Random configuration	68

B.13.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 3 %. In green, Random - 3 % - Random configuration	69
B.14.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 4 %. In green, Random - 4 % - Random configuration	70
B.15.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 5 %. In green, Random - 5 % - Random configuration	71
B.16.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 1 %. In green, Random - 1 % - Random configuration	72
B.17.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 2 %. In green, Random - 2 % - Random configuration	73
B.18.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 3 %. In green, Random - 3 % - Random configuration	74
B.19.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 4 %. In green, Random - 4 % - Random configuration	75
B.20.	Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 5 %. In green, Random - 5 % - Random configuration	76

Índice de Ilustraciones

2.1. Celdas adyacentes a celda i. Fuente: [Pais et al., 2019]	7
2.2. A la izquierda el estado inicial del bosque, cada color representa un tipo de combustible específico. A la derecha la evolución de la cicatriz del fuego (en naranja) y las direcciones de propagación del fuego. Fuente: [Pais et al., 2019]	8
4.1. Landscape Dogrib in Cell2Fire.	16
4.2. Landscape Heterogeneous NF forest in Cell2Fire.	17
4.3. Landscape Heterogeneous C1 forest in Cell2Fire.	17
4.4. Landscape Heterogeneous O1b forest in Cell2Fire.	18
4.5. Landscape Homogeneous C1 forest in Cell2Fire.	18
4.6. Fuelbreaks in forest 20x20 (200 cells), each fuelbreak represents 5% of the forest (20 cells).	19
4.7. Burn Probability Map in Homogeneous C1 forest (20x20) for 5x12x5 fuelbreak	20
4.8. Example of 5x12x5 configurations	21
4.8. Example of 5x12x5 configurations	22
4.9. Fuelbreak configurations with randomization.	23
4.10. Example of possible ignition points	24
4.11. Example of wind direction opening from cell 9.950.	25
5.1. Mean number of burned cells in forests with 1 % fuelbreaks	29
5.2. Mean number of burned cells in forests with 2 % fuelbreaks	29
5.3. Mean number of burned cells in forests with 3 % fuelbreaks	30
5.4. Mean number of burned cells in forests with 4 % fuelbreaks	31
5.5. Mean number of burned cells in forests with 5 % fuelbreaks	31
5.6. Mean \pm standard deviation of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage of the 5x12x5 fuelbreak for each of the forests	32
5.6. Mean \pm standard deviation of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage of the 5x12x5 fuelbreak for each of the forests	33
6.1. Burn Probability Map in forest Homogeneous C1 - 5%	35
6.2. Burn Probability Map in forest Heterogeneous O1b - 5%	36
6.3. Burn Probability Map in forest Heterogeneous C1 - 3%	37

A.1. Fuelbreak configurations using 1 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	46
A.1. Fuelbreak configurations using 1 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	47
A.2. Fuelbreak configurations using 2 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	48
A.2. Fuelbreak configurations using 2 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	49
A.3. Fuelbreak configurations using 3 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	50
A.3. Fuelbreak configurations using 3 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	51
A.4. Fuelbreak configurations using 4 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	52
A.4. Fuelbreak configurations using 4 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	53
A.5. Fuelbreak configurations using 5 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	54
A.5. Fuelbreak configurations using 5 % of the total forest in Homogeneous Forest C1.	55
C.1. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous NF forest	78
C.1. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous NF forest	79
C.1. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous NF forest	80
C.2. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous C1 forest	81
C.2. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous C1 forest	82
C.2. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous C1 forest	83
C.3. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous O1b forest	84
C.3. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous O1b forest	85
C.3. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous O1b forest	86
C.4. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Homogeneous C1 forest	87
C.4. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Homogeneous C1 forest	88

C.4. Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak
in the **Homogeneous C1** forest 89

Capítulo 1

Introducción

Los incendios forestales tienen diversos efectos en los ecosistemas y en los seres vivos de nuestro planeta. Gran parte de la vegetación sobre la tierra ha evolucionado con el fuego siendo una componente esencial en su supervivencia. Sin embargo, la frecuencia y magnitud de estos eventos ha incrementado debido principalmente al cambio climático y al descuido incontrolado de los seres humanos, lo que ha llevado a replantearse la convivencia con este fenómeno [Moritz et al., 2014]. Las agencias nacionales e internacionales dedicadas al combate de incendios se encuentran a su máxima capacidad, lo que indica que las medidas deben ser tomadas antes que ocurran los incendios; gobiernos, empresas y otras instituciones se ven obligadas a pensar cómo incorporar este impacto en la política forestal y planificación territorial [Úbeda and Sarricolea, 2016] para mitigar los efectos negativos de estos eventos.

Debido a esto, es de suma importancia tener en cuenta el concepto interfaz urbano-rural (IUR), que se define como el territorio en el que conviven comunidades humanas (rurales y urbanas) y ecosistemas vegetales (naturales, degradados o productivos). Las definiciones más utilizadas consideran dos zonas, la primera *intermix*, lugares donde las casas se mezclan con la vegetación; y el segundo *interfaz*, lugares donde el área poblada con menos de un 50 % de cobertura de vegetación se encuentra a una distancia inferior a 2.4 km de grandes fragmentos de vegetación (mayores a 5 km²). En Chile, entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos, estas áreas corresponden a 5 % del territorio nacional, las que van incrementando debido a la expansión de ciudades y ecosistemas con mayor carga de combustible, concentrando al rededor del 80 % de la población y el 60 % de los incendios del país. Del total de los incendios entre 1985-2018 CONAF determino que el 56 % fueron accidentales, 32 % intencionales, 11 % sin causa conocida y menos del 1 % naturales (causados principalmente por rayos)[González et al., 2020].

Ya que la gran mayoría de los incendios son causados por acción humana se vuelve de gran importancia un reconocimiento y planificación correcta de las áreas IUR para la seguridad de los habitantes como de los bosques.

Los daños de los incendios se traducen en impactos psicológicos y comunitarios. La experiencia de vivir un incendio tanto a nivel individual como familiar puede generar un gran trauma lo que provoca grandes y prolongados daños a nivel de salud mental de las personas afectadas. Esto se ve reflejado en el día a día, con crisis de angustia, altos niveles de estrés, incertidumbre, depresión y miedo constante; otro factor importante es la pérdida de identidad territorial y la transformación del hábitat cotidiano debido a la pérdida del ambiente natural donde vivían. También afectan a nivel de salud mental de la comunidad, provocando una sensación de abandono por parte del Estado y a la vez el sentimiento de vulnerabilidad frente a amenazas [González et al., 2020].

Los incendios forestales han afectado ecosistemas emblemáticos del país como la Reserva Nacional China Muerta (2015) conocida por su gran cantidad de araucarias, Parque Nacional Torres del Paine (2011-2012), Reserva Nacional Malleco (2002) y Parque Nacional Tolhuaca (2015), provocando grandes pérdidas en flora y fauna silvestre. Chile no es el único país afectado por este problema, países como Australia, Brasil, Grecia, Portugal y Rusia en 2019 sufrieron grandes pérdidas producto a los incendios forestales.

En Chile, solo los incendios del año 2017 atacaron un área mayor a 500.000 hectáreas, que generó emisiones de CO_2 equivalente al 90 % de todas las emisiones del país en 2016 (por transporte, energía, agricultura y residuos). Para entender la dimensión de esto el centro de investigación CR2 menciona que las emisiones de los mega incendios del 2017 se pueden comparar a aproximadamente 23 años de emisiones de CO_2 de todos los vehículos livianos de pasajeros en la Región Metropolitana [González et al., 2020].

Pero esto no solo es un problema social y ecológico, ya que estos daños se traducen en impactos económicos tanto en el sector público como privado. Según la Corporación Nacional Forestal (CONAF), en la temporada de incendios 2017 los gastos del Estado ascendieron a USD 362,2 millones, esto equivale a un costo por hectárea de USD 645,3 considerando las 570.000 hectáreas afectadas distribuidas en 12 regiones del país; estos costos estuvieron distribuidos en combate de incendios (39 %), reconstrucción de viviendas (39 %) y apoyo a sectores productivos (16 %), entre otros. Aun así, estos costos son subestimados al no reflejar otros importantes impactos como lo son la salud de las personas, pérdidas en biodiversidad y turismo. Por el lado del sector privado, la Corporación Chilena de la Madera (CORMA) reportó que durante esta misma temporada aumentaron su inversión a USD 80 millones, aumentando 60 % más que al comienzo de la temporada del 2016; el personal de prevención y combate de incendios forestales aumentó en 700 personas y el monto destinado para prevención se triplicó ascendiendo a USD 18 millones [González et al., 2020].

En octubre de 2019, el gobierno de Chile presentó un Plan Nacional de Prevención y Combate de Incendios Forestales para la temporada 2019/2020, destinando entre el sector público y privado cerca de \$120 mil millones, siendo el mayor gasto histórico para combatir los incendios forestales. Este plan cuenta con un trabajo de coordinación entre los ministerios de Agricultura, Interior, Defensa, Obras Públicas, Medio Ambiente, Energía y Salud, las in-

tendencias y gobiernos regionales, CONAF, ONEMI, Bomberos, Fuerzas Armadas, empresas forestales y eléctricas, la Fiscalía, Carabineros y la PDI ¹. Por lo tanto, estamos frente un problema de interés público, el cual convoca a actores de diversos sectores, demostrando su relevancia multisectorial.

Los países suscritos en el Acuerdo de París (dentro de ellos Chile) deben implementar las acciones necesarias para cumplir los compromisos adquiridos en su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), con el objetivo de crear un desarrollo inclusivo y sostenible. El 9 de abril de 2020 fue aprobada por Sebastián Piñera la actualización de la NDC, la que busca potenciar la sinergia entre los compromisos climáticos y la agenda nacional, demostrando la fuerte relación entre las dimensiones climática y socio-ambiental. Cabe destacar que tanto Chile, como los demás países, se enfrentan a la pandemia por el COVID19, en esta actualización el gobierno menciona que la prioridad esta en "*superar la crisis y en transitar hacia el desarrollo sustentable con un enfoque pragmático y transversal, teniendo como ejes centrales el bienestar de las personas y territorio*". En esta actualización se incorpora un nuevo componente de integración que posiciona el rol de los océanos, de la economía circular, los bosques, de las turberas y de los ecosistemas, como elementos que ayudan a enfrentar las causas como los efectos e impactos del cambio climático, esto debe ir acompañado de la participación de todos los actores (públicos, privados, sociedad civil, academia, ciencia y ciudadanía) para lograr tomar buenas decisiones como lograr implementar los compromisos de Chile con el medio ambiente [Ministerio del Medio Ambiente, 2020].

El bienestar de las personas (salud, identidad, espiritualidad, equilibrio emocional) esta fuertemente ligado a la existencia de bosques, también generan beneficios culturales y de turismo, por el contrario la desaparición de estos provoca impactos negativos en las comunidades. Debido a esto, el gobierno menciona en su actualización que enfrentar los incendios forestales es uno de los desafíos importantes dentro de las componentes de mitigación y adaptación, es necesario mejorar el manejo sostenible de los bosques para disminuir las áreas afectadas como también prevenir el desarrollo de condiciones que potencien estas catástrofes [Ministerio del Medio Ambiente, 2020].

En esta línea Chile toma tres compromisos [Ministerio del Medio Ambiente, 2020]:

1. **Contribución de Integración - UTCUTS - Bosques Nro 4 (I4):** Manejo sustentable y recuperación de 200.000 hectáreas de bosques nativos, considerando criterios de sustentabilidad que permitan garantizar la conservación del bosque, es decir, su permanencia en el tiempo.
2. **Contribución de Integración - UTCUTS - Bosques Nro 5 (I5):** Forestar 200.000 hectáreas, de las cuales al menos 100.000 hectáreas corresponden a cubierta forestal permanente, con al menos 70.000 hectáreas con especies nativas. Para que la reforestación cumpla con los objetivos propuestos debe cumplir ciertas medidas, una de ellas es que debe aumentar el valor paisajístico de los territorios; generar y mantener corre-

¹Plan para la prevención y combate de incendios forestales, 3 de octubre 2019

dores biológicos; mejorar medidas de prevención, presupresión y combate de incendios forestales, entre otras.

- 3. Contribución de Integración - UTCUTS - Bosques Nro 6 (I6):** Reducir las emisiones del sector forestal por degradación y deforestación del bosque nativo en un 25 % al 2030 considerando las emisiones promedio entre el periodo 2001-2013. Una de las acciones para lograr esto es potenciar modelos de gestión en prevención de incendios forestales y restauración de áreas quemadas.

Los incendios forestales a pesar de ser desastres naturales son provocados principalmente por la acción humana, lo que provoca que sea necesario desarrollar importantes labores preventivas y no solo acciones mitigatorias [Centro de Políticas Públicas UC, 2018]. Esta característica diferencia a los incendios forestales de catástrofes sismológicas o climáticas, y es por esto que una política pública preventiva puede generar una disminución en la ocurrencia como también en los impactos de los incendios forestales [Abt et al., 2015]. Por lo tanto, para atacar este problema es necesario no solo contar con una mejor capacidad tecnológica y humana disponible, sino que también con acciones preventivas las cuales son más eficientes y efectivas, siendo uno de los aspectos sin considerar de las políticas públicas vinculadas a los incendios forestales [Centro de Políticas Públicas UC, 2018].

Las acciones preventivas pueden ser en los ámbitos social, punitivo y mitigatorio. El primero busca generar y estimular hábitos y prácticas que disminuyan la probabilidad de los incendios provocados accidentalmente a través de estrategias de sensibilización y organización de comunidades generando respuestas adecuadas por parte de la población una vez que se enfrentan al incendio; la segunda tiene relación con penalizaciones y sanciones a quienes realicen acciones que puedan generar incendios forestales; y por último, la prevención mitigatoria consiste en medidas de planificación espacial, gestión de combustibles y acondicionamiento del terreno, un ejemplo de esto es la instalación de cortafuegos [Centro de Políticas Públicas UC, 2018].

El trabajo de esta tesis estará dentro del marco de la silvicultura preventiva o forest fuel management, con la cual es posible disminuir el efecto incontrolado de los incendios a través de la modificación del combustible forestales y/o construcción de cortafuegos. Estas actividades son preventivas, es decir, se realizan antes que vengan las jornadas de incendios con el fin que pueda retardar su propagación y de forma indirecta apoyar la supresión. Dentro de estas actividades se encuentra la reducción de combustibles forestales, cosecha forestal planificada, quemas prescritas, aclareo y construcción de cortafuegos [Agee and Skinner, 2005]. Los planificadores de la tierra se ven enfrentados a un complejo proceso, puesto que deben decidir qué decisión silvicultural tomar, en qué lugar espacial, y en qué periodo de tiempo [Chung, 2015].

Existe evidencia científica de que es posible modificar el comportamiento y propagación de los incendios forestales a través de una adecuada ubicación de cortafuegos [Finney, 2001], así como la forma de ellos (topología). Es aquí donde se centrará el trabajo de esta tesis usando

como base el simulador Cell2Fire desarrollado por Carrasco Barra J. [Carrasco Barra, 2019].

Por lo tanto, la pregunta de investigación a responder es: **Dada una topografía de bosque y escenarios climáticos, ¿cuál es la configuración espacial de cortafuegos óptima para minimizar los daños en los incendios forestales?**

El Centro de Políticas Públicas UC menciona que dado el contexto de Chile, concentrar los recursos en combate del fuego es una estrategia poco eficiente, siendo la prevención el principal foco para este tipo de catástrofes [Centro de Políticas Públicas UC, 2018]. Por otro lado, CR2 menciona que las actividades de prevención, estrategias, y políticas de manejo y ordenamiento del paisaje, deben ser asumidas como prioritarias con el objetivo de evitar y/o disminuir el daño y pérdidas socio económicas y ambientales provocadas por los incendios, más aún en un contexto de cambio climático que a pesar de las medidas tomadas por los gobiernos es bastante probable que en las próximas décadas sigan aumentando la ocurrencia de incendios forestales [González et al., 2020].

El desarrollo de esta tesis ayudará a avanzar en el diseño de paisajes resilientes, a través de la planificación y ordenamiento territorial permitiendo abordar riesgos de un modo adaptativo.

1.1. Objetivos de investigación

Dado los antecedentes expuesto, se presentan los objetivos propuestos a desarrollar a lo largo de esta investigación.

1.1.1. Objetivo General

Desarrollar, evaluar e integrar diferentes patrones espaciales de cortafuego en el simulador de incendios forestales Cell2Fire, con el propósito de minimizar las pérdidas forestales por estos eventos.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Construir heurísticas para el diseño de patrones de cortafuego en base a su superficie y ubicación, de modo de encontrar la topología que minimiza las pérdidas por incendio.
2. Realizar análisis de sensibilidad de la topología de los cortafuegos bajo diferentes bosques y escenarios meteorológicos.

Capítulo 2

Marco Conceptual

2.1. Cell2Fire

Debido al carácter estocástico que existe en la propagación del fuego, calcular los riesgos de los incendios forestales no es una tarea trivial. Se han desarrollado diferentes modelos para estimar los riesgos de los incendios, entre estos se encuentran: Prometheus [Tymstra, 2002], LANDIS [He et al., 1999], FARSITE [Finney, 1998], BFOLDS [Perera et al., 2002], KITRAL [Julio et al., 1997] y Cell2Fire [Carrasco Barra, 2019]. Cabe destacar que KITRAL fue desarrollado en Chile y Cell2Fire fue desarrollado en conjunto por investigadores de Chile, EEUU y Canada.

Esta tesis trabajara en base al modelo Cell2Fire, sistema desarrollado en Python y C++. Cell2Fire permite simular el crecimiento del fuego a través de celdas cuadrículas que representan el paisaje forestal real, simulando el crecimiento del fuego a través del estado de todas las celdas a medida que el modelo progresa en pasos de tiempo discretos e igualmente espaciados. Dos de las mas importantes características para modelar incendios forestales son la tasa de propagación en inglés *rate of spread* (ROS) y la intensidad, ambas están influenciadas por el tipo de combustible, la humedad, velocidad del viento y la pendiente del lugar que se quiere evaluar. También se debe considerar que el crecimiento del fuego sigue una geometría de elipse, que influye en la predicción del ROS [Carrasco Barra, 2019].

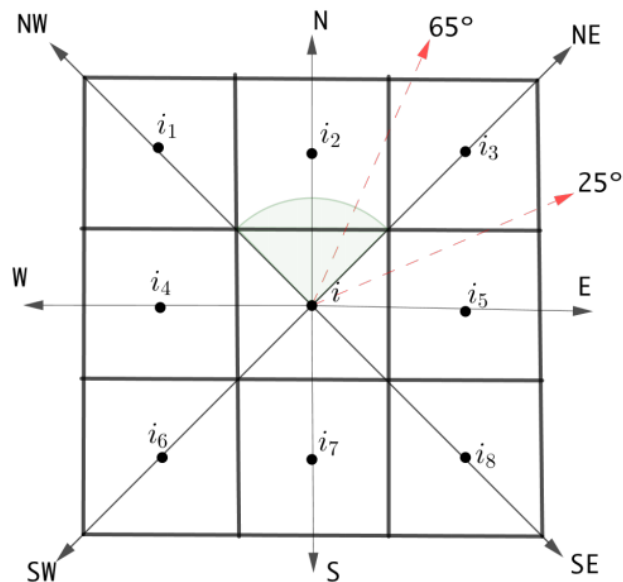
Cada una de estas celdas cuadrículas contiene información de variables relevantes para la simulación del fuego, estas son:

1. **Fuel type:** Esta variable sigue los criterios de clasificación del sistema *Canadian Forest Fire Behavior Prediction* (FBP) que designa a cada celda un tipo de combustible (por ejemplo, conífera, hierba, no combustible, entre otras). Esto se utiliza para predecir el ROS.

2. **Slope:** El porcentaje de pendiente en términos de la subida vertical de la celda y celdas adyacentes también tiene impacto en la predicción del ROS.
3. **Elevation:** Indica la altitud de la celda en metros con respecto al nivel del mar.
4. **Location:** La latitud y longitud de cada celda.
5. **Status:** Existen 5 estados para cada celda los cuales son:
 - (a) **Available:** Representa que la celda contiene un tipo de combustible inflamable, es decir, potencial celda que puede quemarse.
 - (b) **Burning:** Indica que la celda contiene un fuego activo.
 - (c) **Burned:** La celda ha sido quemada por completo y ya no se considera para en el resto de la simulación.
 - (d) **Harvested:** Se integra este estado para que el simulador pueda integrarse a un sistema de planificación estrategia de cosecha.
 - (e) **Non-Fuel:** Indica tipos de combustibles no inflamables como ríos, lagos o rocas. Al igual que los dos anteriores no se consideran en la simulación ya que no tiene predicción de ROS asociada.

El bosque se modela como una región rectangular compuesta de n filas y m columnas, esto se traduce en $n \times m$ celdas cuadrículas con áreas idénticas, es posible cambiar el tamaño de cada celda considerando las limitaciones que imponen los datos disponibles de cada bosque. Debido a que cada celda contiene información propia es posible tratar a cada una de estas como objetos individuales que interactúan entre sí. Cada celda tiene como máximo 8 celdas adyacentes (ver figura 2.1), estos son las únicas celdas que puede afectar la celda principal en un solo paso del tiempo, considerando pasos del tiempo pequeños.

Figura 2.1: Celdas adyacentes a celda i . Fuente: [Pais et al., 2019]



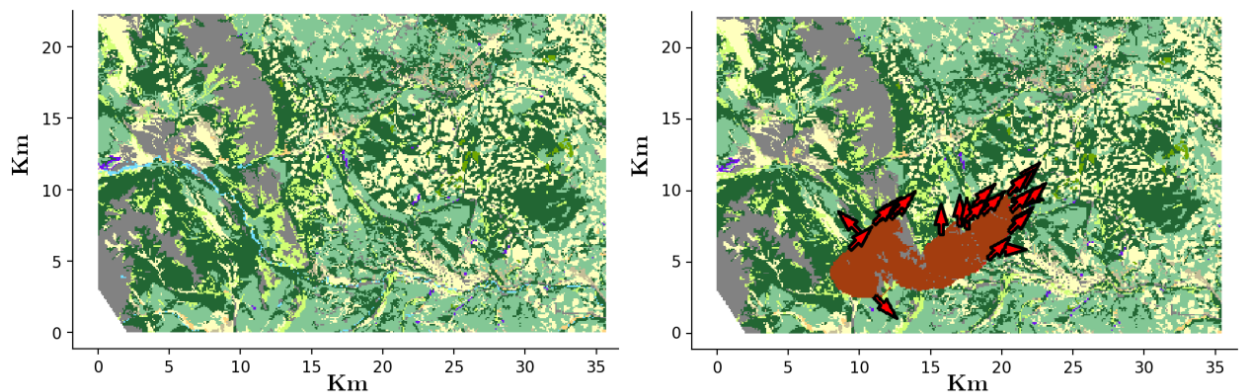
Cabe destacar que cuando el fuego entra en una nueva celda, se utilizan las características de la celda adyacente que la atacó hasta que el fuego llegue al centro de la celda atacada. En este punto la celda recibe un mensaje y calcula su ROS basado en el clima actual y características propias, si el ROS es mayor a uno especificado por el usuario la celda cambia su estado a *Burning*. Cuando no hay celdas adyacentes disponibles o la celda principal cumple el criterio de quemado esta cambia su estado a *Burned* y no es considerada para los siguientes pasos. Esto sigue hasta el fin del incendio, que ocurre de dos formas, ha acabado la ventana de tiempo de simulación o no hay mas celdas disponibles para quemar.

Cell2Fire incluye tres fuentes de incertidumbre que pueden afectar significativamente la propagación del fuego, la primera es el punto de ignición seleccionado, el cual puede seguir una distribución de probabilidad especifica para cada celda o considerar una igual para cada una de las celdas; la segunda el error inherente en el sistema FBP permitiendo obtener diferentes cicatrices de incendios considerando la incertidumbre en la predicción del ROS; y por último, información de flujos meteorológicos entregados por el usuario, permitiendo estudiar el comportamiento del fuego bajo distintos escenarios meteorológicos.

Finalmente, los principales *outputs* que entrega Cell2Fire son:

1. **Celdas quemadas:** Archivo que indica el estado de cada una de las celdas. El valor 1 indica que la celda ha sido quemada, por el contrario, el valor 0 indica que la celda esta disponible para ser quemada. Esto permite generar mapas de probabilidad de quema para cada una de las celdas luego se simular distintos incendios.
2. **Gráficos:** Estado inicial del bosque, la evolución del la cicatriz del incendio y el envío/recibo de mensajes que indican la dirección de propagación. Un ejemplo de esto se encuentra en la figura 2.2.

Figura 2.2: A la izquierda el estado inicial del bosque, cada color representa un tipo de combustible especifico. A la derecha la evolución de la cicatriz del fuego (en naranja) y las direcciones de propagación del fuego. Fuente: [Pais et al., 2019]



3. **Estadísticas:** Información final del estado del bosque, considera mensajes de dirección de propagación, las fechas de ignición, la evolución del fuego (valores del ROS y la distancia entre cada eje), número de celdas quemadas y disponibles, promedio del porcentaje del bosque disponible considerando todos los escenarios distintos (puntos de ignición múltiple y condiciones meteorológicas).

2.2. Estudios de cortafuegos

Los tratamientos de combustible se han identificado como una de las claves para combatir y disminuir el tamaño y gravedad de los incendio forestal [Agee and Skinner, 2005]

Finney fue unos de los primeros en buscar el efecto de cortafuegos en el diseño espacial de bosques. Probo la efectividad diferentes disposiciones de patrones de cortafuegos, variando el tamaño, forma y ubicación, con el objetivo de disminuir la tasa de propagación del incendio. Concluye que al comprender el papel que juega el tamaño, forma y ubicación del cortafuego en el crecimiento y comportamiento del fuego permitirá tomar mejores decisiones en torno a la prevención de incendios forestales ya que disminuyen la tasa de propagación del incendio [Finney, 2001].

La mayoría de las investigaciones en esta área sugieren que un gran porcentaje del bosque debe ser tratado para alterar el efecto del incendio, entre 20% y 30% del bosque aproximadamente (por ejemplo, [Finney et al., 2008], [Price, 2012]). Estos altos porcentajes de utilización no son concordantes con las limitaciones que existen sobre los recursos forestales, como también sobre las oportunidades reales de realizar un cortafuego dentro de un bosque, hay otros estudios que sugieren que el tamaño final del incendio se puede ver afectado por tratamientos del 5% [Cochrane et al., 2012] o 3% [Oliveira et al., 2016]

Diversas investigaciones han estudiado la disposiciones y niveles de tratamientos de combustibles y su efecto en el desarrollo del incendio utilizando bosques reales como también bosques creados, pero ninguno ha realizado un estudio a fondo del efecto que tiene la topología geométrica de los corta fuegos y la disposición espacial entre estos [Finney, 2001], [Loehle, 2004], [Finney et al., 2008], [Wei et al., 2008], [Moghaddas et al., 2010], [Bradstock et al., 2012].

Otros han buscado modelar el riesgo que provoca el incendio como también el efecto sobre este riesgo [Ager et al., 2006], [Parisien et al., 2010].

Ager define el cambio de valor esperado de un incendio, calculado como el producto de: 1) la probabilidad de un incendio en una intensidad y lugar específicos, y 2) el cambio resultante del valor financiero o ecológico. La definición del valor esperado tiene en cuenta la propagación, la intensidad y los daños de los incendios forestales a escala del paisaje en una sola medida, lo que proporciona una métrica relativamente sólida para comparar los efectos de los escenarios de tratamiento del combustible

Parisen utiliza la probabilidad de quema (*Burn Probability*) para determinar las diferencias en los riesgos asociados a los incendios forestales, la cual es definida por:

$$BP_i = \frac{b_i}{N} \times 100 \quad (2.1)$$

Donde N es el número de simulaciones, b_i el número de veces que se quemó la celda i y BP_i indica la probabilidad asociada a esa celda luego del total de simulaciones. Realizan una distinción entre el promedio y varianza de la BP , analizando los efectos de los distintos tratamientos en ambos valores de la probabilidad de quema.

Capítulo 3

Políticas Públicas Forestales en Chile

Debido al problema público, de carácter global, que generan los incendios forestales los gobiernos de todo el mundo se ven en la obligación de pensar en cómo incorporar los impactos de los incendios forestales en el desarrollo correcto de una política forestal como también en la planificación territorial del país [Úbeda and Sarricolea, 2016]. Por lo tanto, la clave para enfrentar este problema es la prevención, siendo necesario generar políticas de planificación y diseño del territorio que ayuden a reducir el riesgo y daños causados por los incendios forestales [Moreira et al., 2020].

Algunas de las medidas preventivas que se han desarrollado son la modificación del combustible forestal, buscando disminuir el peligro de los incendios, como ejemplo de medidas son cortar y limpiar el bosque, usar quemas prescritas para reducir el combustible superficial, extraer y ralea los árboles y la construcción de cortafuegos [Agee and Skinner, 2005]. Estas medidas no deben ser realizadas al azar, ya que existen muchas alternativas posibles de cuándo y dónde tratar los combustibles, y los efectos indirectos que conllevan estas acciones, ya que pueden afectar la biodiversidad, erosión del suelo y calidad del agua, entre otros efectos negativos [Finney, 2001, Moghaddas and Craggs, 2007, Shinneman et al., 2019].

Si bien abundan referencias sobre propuestas de prescripciones para el control del peligro de los incendios, hay una brecha importante entre estas iniciativas y las normativas locales de los países, las cuales en muchos casos no tienen concordancia con el potencial daño de los incendios dentro del escenario de cambio climático que nos encontramos. Chile cuenta con un desarrollo formal en materia de protección contra incendios forestales desde 1967, generando planes y programas de prevención y combate contra los incendios, considerando el ámbito público y privado. Las instituciones encargadas se han visto en la necesidad de adaptarse al nuevo contexto generando políticas y trabajo coordinado que han ayudado de forma parcial a disminuir el riesgo latente de los incendios [Castillo, 2016], por ejemplo, existe la Ley de Quemadas Controladas de 1980 (Decreto Supremo 276/1980) la cual necesita modificaciones urgentes debido a que las condiciones de biomasa, ordenación del territorio y conformación

del paisaje forestal han experimentado grandes cambios en los últimos 40 años desde que se promulgo la Ley y no reflejan la modernización de estas practicas en zonas de interfaz urbano rural, tampoco considera una revisión periódica del estado de la vegetación en los terrenos privados, siendo esto un potencial vector de propagación del fuego.

A pesar de que existen normativas vigentes que ayuden a disminuir el impacto del incendio, estas no se realizan, son mal ejecutadas o son insuficientes con respecto a la necesidad real de cada lugar, sobre todo en lugares con altas pendientes y vientos locales intensos, condiciones que favorecen la expansión del incendio. Esta fue una de las razones del violento incendio en Valparaíso en abril del 2014, donde se quemaron más de 3.000 casas y 15 personas fallecieron, en un área donde no se intervino con fines preventivos. Chile no cuenta con una evaluación y diagnostico que permita generar un plan integrado contra los incendios en las zonas de interfaz urbano rural, considerando las condiciones de cada lugar para generar acciones factibles y oportunas, por lo tanto, existe la necesidad urgente de contar con herramientas de gestión territorial que ayude a mantener segura a la población frente a los incendios [Castillo, 2016].

Los expertos indican que las comunidades que se encuentran en la interfaz urbano rural pueden planificar el uso de la tierra y las normas de las construcciones aledañas para ayudar a que no se quemen viviendas u otro tipo de estructura durante el incendio, es decir, con la tecnología actual se podrían construir comunidades resilientes a los incendios forestales en donde el fuego podría atravesar la comunidad y no afectar ninguna de las estructuras, incluso con las personas dentro de los hogares [Garay Moena et al., 2019].

Por ejemplo, en Australia se considero en la planificación urbana el peligro latente de los incendios, lo que se tradujo en una nueva regulación para las normas de construcción de las nuevas edificaciones en territorios considerados como interfaz urbano rural, donde se exige que la capacidad de resistencia de las edificaciones supere los $800^{\circ}C$ ya que en los incendios pueden alcanzar los $1300^{\circ}C$. Pero no tan solo la norma hace referencia a las dimensiones y materiales de la construcción, también pone limites a la cantidad de personas que pueden soportar las comunidades de acuerdo a la cercanía con zonas de peligro, también genera criterios dentro de la planificación urbana para que empresas que procesen o almacenen elementos inflamables no puedan operar cerca de bosques o zonas de alto riesgo [Garay Moena et al., 2019].

Otra medida importante a considerar en la planificación territorial en las áreas de interfaz urbano rural, es la distancia entre las plantaciones forestales (considerando toda su cadena productiva) y los centros poblados, no solo considerando la distancia física, si no que se debe tener en cuenta las especies predominantes y la densidad de las plantaciones, reforzar la seguridad propia con la construcción de cortafuegos, su limpieza y su actualización permanente, como también un abastecimiento de agua y una red caminera que permita desplazamientos. Una de las grandes propuestas para este problema es la creación de “villas de la madera”, poblados regulados, de tamaño pequeño y mediano, que consideran servicios básicos y equi-

pamiento entregando subsidios a las familias involucradas, para lograr esto es importante una acción de todos los actores, en donde las grandes empresas deben donar los terrenos para sus trabajadores como también la aplicación del subsidio rural por parte del Ministerio. Para la reconstrucción de Santa Olga, luego del megaincendio forestal que la afecto en 2017 quemándola por completo, se trabajo con un esquema de colaboración similar logrando generar un “modelo de poblamiento” con índices de infraestructura y viviendas superiores a la media del subsidio rural, contando con abastecimiento de agua potable e infraestructura social básica de primer nivel, siendo posible por la articulación pública-privada [Galilea, 2019].

Por lo tanto, es sumamente importante avanzar en una política de gestión territorial que coordine la acción pública y privada, un avance en esto ha sido la incorporación de los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial (PROT) en la Ley Orgánica Constitucional sobre Gobierno y Administración Regional. Estos planes tienen por objetivo llegar a acuerdos sobre el uso del territorio, que consideren y mejoren la calidad de vida de la población como también tengan en cuenta un desarrollo sustentable, enfocando el desarrollo productivo en las áreas con especialización y ventaja regional, y mejorando la infraestructura energética, vial y su equipamiento social básico. En esta línea la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE) publicó la “Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial” pero tiene falencias, ya que no considera a los incendios forestales como una amenaza natural, siendo que estos eventos son potenciados en el actual escenario de cambio climático [Galilea, 2020].

Por otro lado, es importante mejorar la reglamentación, control y fiscalización, teniendo foco en evitar la ocurrencia del incendios. La Corporación Nacional Forestal (CONAF) debe tener una mayor capacidad fiscalizadora, donde existan procedimientos expeditos en tramites y multas para responsables, ya que la limpieza y mantenimiento del bosque no debe ser una tarea de buena voluntad, sino que una imposición legal, reglamentada con controles y multas establecidas. Este no es solo un trabajo que se debe hacer desde el sector público, las empresas privadas ligadas a esta área, principalmente las empresas forestales, deben cambiar sus modelos de producción en donde utilicen nuevas tecnologías y modelos organizativos considerando acciones coordinadas de prevención y combate de los incendios forestales. Si bien, en los últimos años las empresas forestales han aumentado los recursos destinados a estas tareas es necesario seguir aprendiendo y sistematizando la información recopilada de los diferentes siniestros, como también aportar en una autofiscalización [Galilea, 2019].

Si bien la articulación público-privado tiene una base sólida en la cual se diseñan y proponen estrategias para la prevención y combate de los incendios, ha sido insuficiente la investigación y desarrollo entorno al tema, por lo tanto, hay un claro déficit en investigación aplicada sobre todo en lo referido a la simulación del comportamiento del incendio y el nivel de impacto potencial, siendo estas herramientas muy útiles para la toma de decisiones [Castillo, 2016]. Para solucionar lo anterior, es necesario que el ámbito público este articulado con la ciencia, en muchas ocasiones la relación política-ciencia es esporádica, con consultorías a corto plazo que ayudan ineficientemente la formación de políticas públicas

[Gallardo et al., 2018]. Una de las falencias del rol de Estado es la baja coordinación entre generadores de políticas públicas y financistas de los proyectos de investigación, sin lograr un trabajo interdisciplinar que permita solucionar las problemáticas del cambio climático [Borquéz González, 2017], en este caso, la problemática de los incendios forestales.

En esta línea, el trabajo desarrollado en esta tesis es parte de un proyecto de investigación financiado por FONDEF, el cual plantea el diseño de una herramienta tecnológica de planificación del paisaje, que requerirá, entender los factores que influyen en la ignición y propagación de los incendios, así como las características de las barreras naturales y artificiales que pueden operar como cortafuegos y las interacciones que tienen estas barreras con el entorno, sirviendo de ayuda a municipalidades y organizaciones público y privadas que estén a cargo de promover acciones y tomar decisiones sobre los territorios que están bajo la amenaza latente de los incendios forestales.

En Chile para abordar este problema se han desarrollado modelos que obtuvieron correlaciones significativas entre área quemada y condiciones climáticas (promedio de temperatura y precipitación acumulada [Urrutia-Jalabert et al., 2018]. Esta la creación del simulador de incendios forestales chileno llamado KITRAL [Julio et al., 1997] que toma datos de variables atmosféricas desde estaciones meteorológicas en superficie para predecir un índice diario de riesgo de incendios forestales para cada región del país, pero este índice tiene limitantes ya que las estaciones meteorológicas suelen estar alejadas de las zonas donde ocurren los incendios. KITRAL también propone su propio modelo de combustible forestal (MCF) que determinan la velocidad de propagación (ROS), altura de flama e intensidad calórica liberada en la combustión demostrado muy buenos resultados como sistema de predicción de incendios superficiales, es decir, un incendio que se propaga por la vegetación que se encuentra inmediatamente encima de la superficie del terreno [Pedernera et al., 2010, Castillo et al., 2017], por lo tanto, no considera el fuego de copas, el cual se propaga por el dosel de los árboles, más peligrosos por lo general que los incendios superficiales.

Por su parte CONAF cuenta con la Sección de Análisis y Predicción de Incendios Forestales (SAPIF), cuya labor principal es proporcionar apoyo logístico y soporte, a través de herramientas de análisis y predicción basada en información meteorológica crítica para estudiar la generación de incendios forestales, así como también, índices de riesgo de incendios. Genera además pronósticos del comportamiento del fuego cuando la situación lo amerita. Si bien, CONAF declara un programa de Silvicultura Preventiva, no menciona ningún sistema tecnológico para llevar a cabo tareas de localización y priorización de tratamientos de combustibles y/o cortafuegos. Más bien es un manual para llevar a cabo las alternativas de manejo en función de la disponibilidad del combustible, procesos técnicos, regulación legal, tiempo del proceso, disponibilidad del presupuesto ¹. Adicionalmente CONAF dispone del software Wildfire Analyst (que utiliza los modelos de combustibles de KITRAL) para la detección y mapas de incendios forestales que les permite simular el comportamiento del fuego para dar mejor respuesta al combate una vez iniciado el incendio, pero no para apoyar

¹Silvicultura Preventiva para la prevención de incendios forestales en plantaciones forestales

decisiones de manejo de paisajes como solución preventiva, y es esta falencia la que busca solucionar el proyecto FONDEF (“Diseño de paisajes resistentes a incendios forestales integrando modelos de simulación, optimización e inteligencia artificial”) del cual es parte esta tesis.

Capítulo 4

Diseño Metodológico

El diseño metodológico de los experimentos realizados se divide en 4 secciones. En la sección 4.1 se detallan los 4 bosques utilizados; en la sección 4.2 las configuraciones de cortafuegos con distintos porcentajes de celdas utilizadas; en la sección 4.3 los 8 puntos de ignición; finalmente en la sección 4.4 el clima y horas simuladas de incendio.

4.1. Bosques

Debido a que Cell2Fire utiliza el sistema canadiense FBP para predecir la velocidad de propagación de los incendios, el consumo de combustible y la intensidad del fuego, en función del tipo de combustible; se utilizó el caso de estudio Dogrib, incendio que se inició el 21 de septiembre de 2001 como consecuencia de un incendio en un campamento abandonado en *Rocky Mountain* al suroeste de la región de Alberta en Canadá.

En la figura 4.1 se encuentra el paisaje en Cell2Fire del bosque de este caso estudio, el cual tiene 79.611 celdas (357x223), cada celda de 1 ha. Este es un paisaje heterogéneo que incluye diferentes tipos de combustible, como también celdas no inflamables, como montañas o ríos. Para más información del caso visitar el siguiente enlace http://www.firegrowthmodel.ca/prometheus/software_e.php.

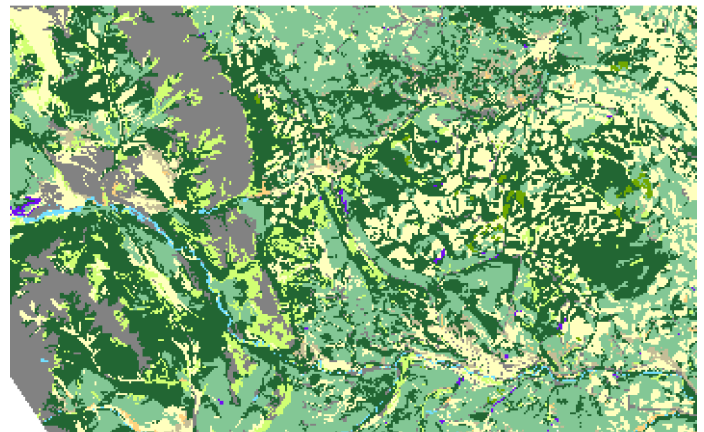


Figura 4.1: Landscape Dogrib in Cell2Fire.

Para los experimentos realizados se utilizaron 4 bosques distintos, cada uno de 10.000 celdas (100x100), con cada celda de 1 ha. El primer bosque lo denominamos como *Heterogeneous NF*, este es un parche del caso estudio Dogrib, que corresponde a la esquina superior izquierda en la figura 4.1. Su composición mantiene la heterogeneidad de Dogrib ya que incluye celdas no inflamables, la frecuencia de tipo de combustible y su paisaje se encuentran en la tabla 4.1 y figura 4.2 respectivamente, a partir de este bosque se crearon dos más reemplazando las celdas con combustible NF por otro combustible. El segundo bosque fue denominado como *Heterogeneous C1*, se cambio todas las celdas con combustible NF (Non-Fuel) por C1 (*Spruce-Lichen Woodland*), la frecuencia de tipo de combustible y su paisaje se encuentran en la tabla 4.2 y figura 4.3 respectivamente.

Heterogeneous NF	# cells
C2 Boreal Spruce	2.854
NF Non-fuel	2.735
O1a Matted Grass	1.788
C3 Mature Jack or Lodgepole Pine	1.422
C1 Spruce-Lichen Woodland	927
D1 Leafless Aspen	248
M1 Boreal Mixedwood - Leafless	22
C7 Ponderosa Pine - Douglas-Fir	4

Tabla 4.1: Frequency of fuel type in Heterogeneous NF forest.

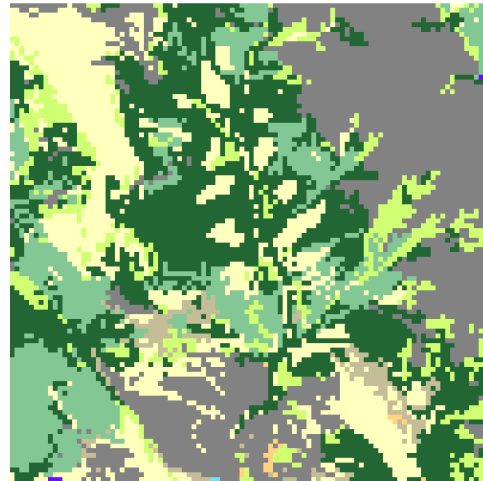


Figura 4.2: Landscape Heterogeneous NF forest in Cell2Fire.

Heterogeneous C1	# cells
C1 Spruce-Lichen Woodland	3.662
C2 Boreal Spruce	2.854
O1a Matted Grass	1.788
C3 Mature Jack or Lodgepole Pine	1.422
D1 Leafless Aspen	248
M1 Boreal Mixedwood - Leafless	22
C7 Ponderosa Pine - Douglas-Fir	4

Tabla 4.2: Frequency of fuel type in Heterogeneous C1 forest.

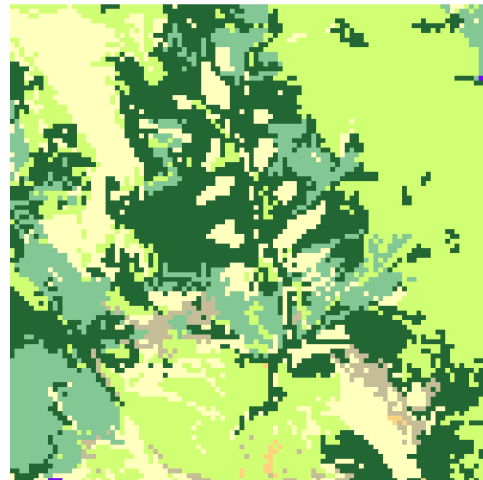


Figura 4.3: Landscape Heterogeneous C1 forest in Cell2Fire.

El tercer bosque tiene por nombre *Heterogeneous O1b* y se cambiaron todas las celdas con combustible NF por O1b (*Standing Grass*), la frecuencia de tipo de combustible y su paisaje se encuentran en la tabla 4.3 y figura 4.4 respectivamente. Por último, se trabajó con un bosque homogéneo que lleva por nombre *Homogeneous C1* y solo contiene celdas con combustible C1, la frecuencia de tipo de combustible y su paisaje se encuentran en la tabla 4.4 y en la figura 4.5 respectivamente.

Heterogeneous O1b	# cells
C2 Boreal Spruce	2.854
O1b Standing Grass	2.735
O1a Matted Grass	1.788
C3 Mature Jack or Lodgepole Pine	1.422
C1 Spruce-Lichen Woodland	927
D1 Leafless Aspen	248
M1 Boreal Mixedwood - Leafless	22
C7 Ponderosa Pine - Douglas-Fir	4

Tabla 4.3: Frequency of fuel type in Heterogeneous O1b forest.

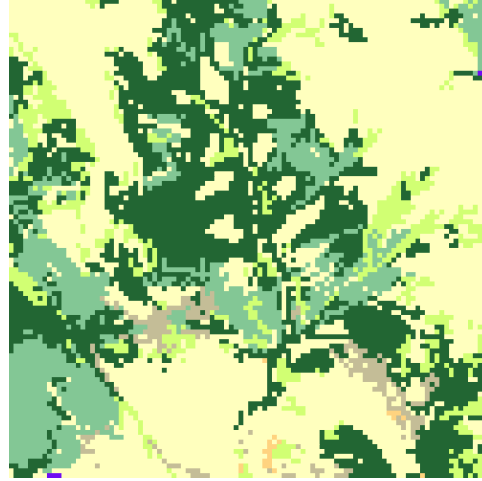


Figura 4.4: Landscape Heterogeneous O1b forest in Cell2Fire.

Homogeneous C1	# cells
C1 Spruce-Lichen Woodland	10.000

Tabla 4.4: Frequency of fuel type in Homogeneous C1 forest.

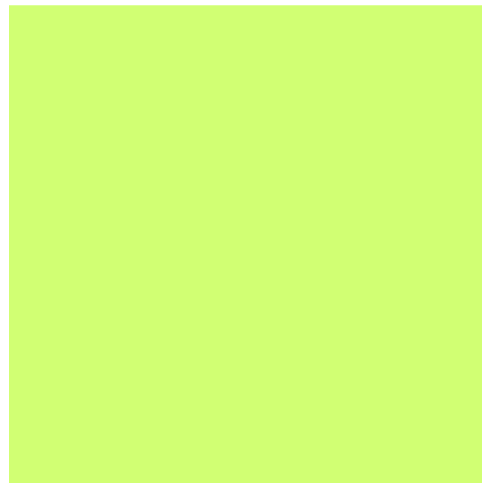


Figura 4.5: Landscape Homogeneous C1 forest in Cell2Fire.

Se utilizaron bosques de 10.000 celdas debido a que realizar todas las simulaciones (912.000 en total) en el bosque del caso de estudio Dogrib (79.611 celdas) requiere una alto tiempo de procesamiento, que superaba la capacidad computacional disponible.

4.2. Cortafuegos

Se crearon 20 figuras de cortafuegos dentro de un bosque *Homogeneous C1* de tamaño 20x20 (200 celdas), cada figura representa el 5% del bosque (20 celdas). Se simularon incendios forestales, con la metodología descrita en este capítulo, sobre las 20 figuras creadas. Se seleccionaron las 9 figuras con menor promedio de celdas quemadas luego de todas las simulaciones. Las figuras seleccionadas tienen forma cóncava, barras paralelas y un rectángulo. Una primera conclusión es que las figuras cóncavas son mejor que el resto, teniendo la hipótesis de que pueden “encerrar” el fuego por su forma cóncava. Los cortafuegos seleccionados se muestran en la figura 4.6.

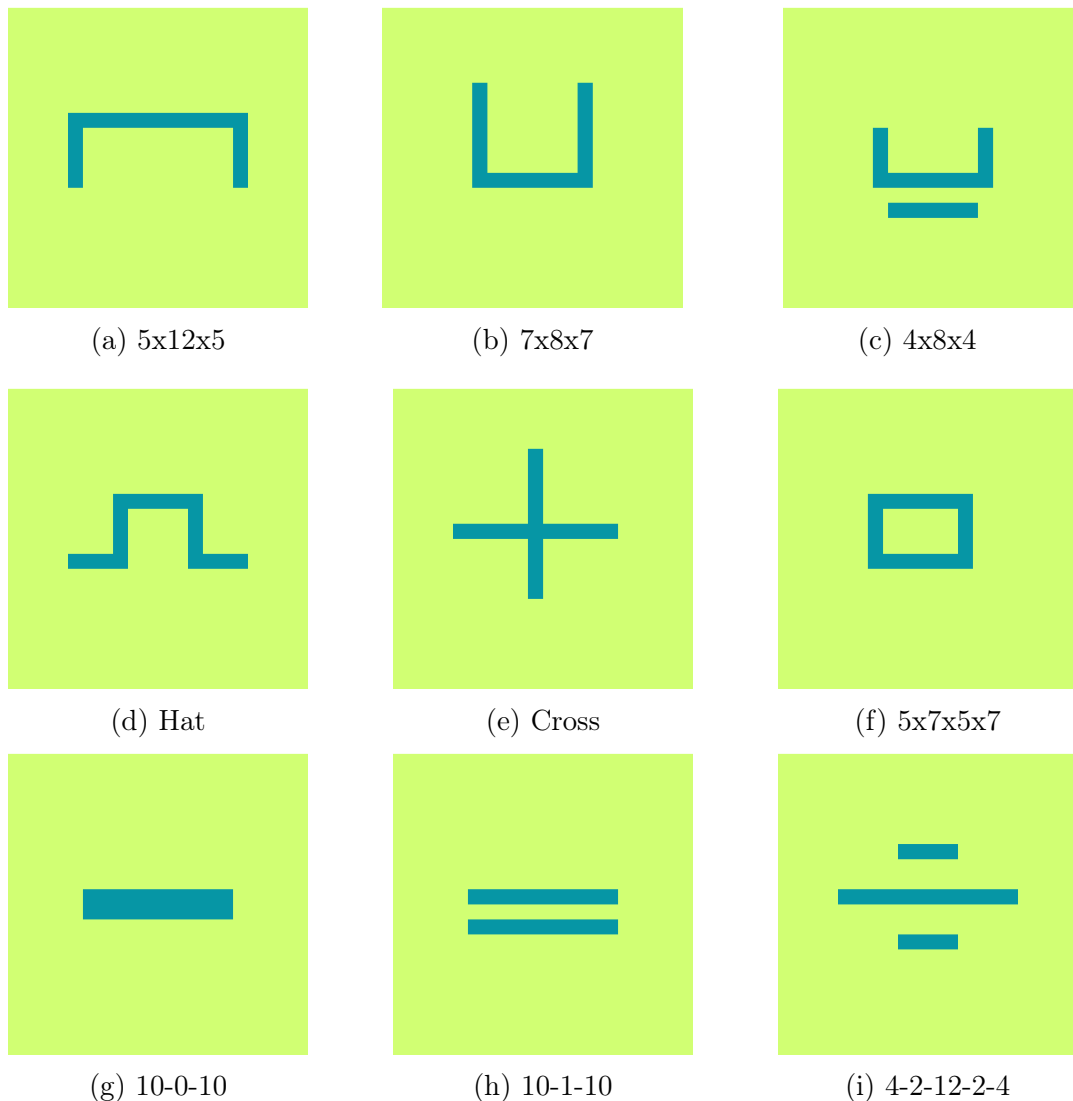


Figura 4.6: Fuelbreaks in forest 20x20 (200 cells), each fuelbreak represents 5% of the forest (20 cells).

A modo de ejemplo en la figura 4.7 se muestran los mapas de probabilidad de quema del cortafuego 5x12x5 sobre el bosque *Homogeneous C1* de 400 celdas (20x20), se realizaron 100 simulaciones para cada mapa de probabilidad. En la figura 4.7a se observa que el fuego no cruza el cortafuego al impactarlo, sino que lo rodea, esto también ocurre en la figura 4.7b donde el fuego que no es atrapado por el lado cóncavo del cortafuego avanza por los costados. En el capítulo 6 se discutirá más sobre este tipo de gráficos.

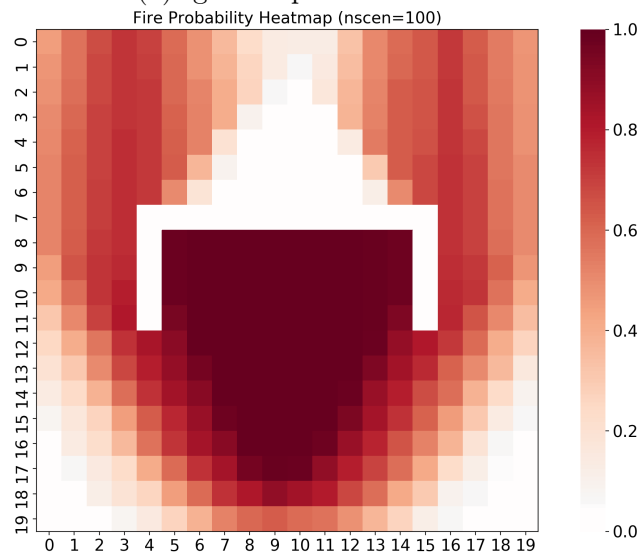
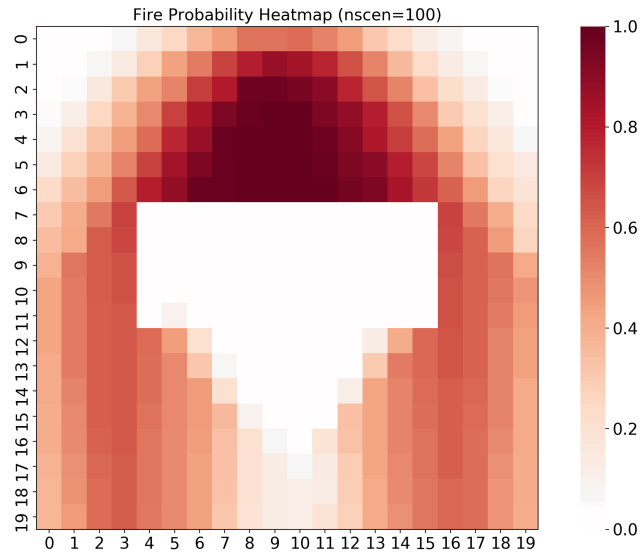
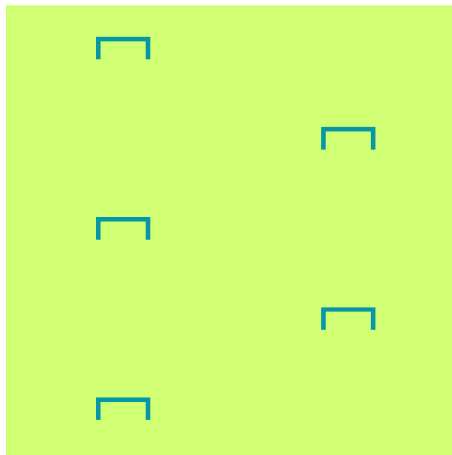


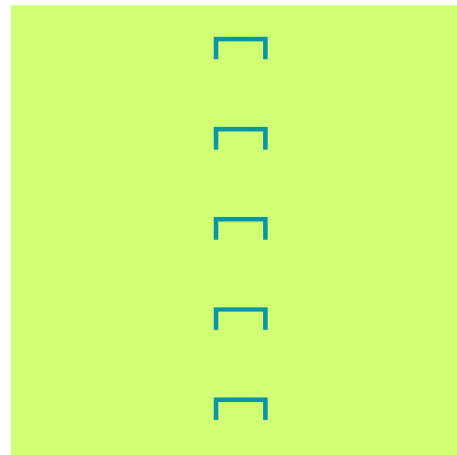
Figura 4.7: Burn Probability Map in Homogeneous C1 forest (20x20) for 5x12x5 fuelbreak

Dentro de los 4 bosques de la sección anterior se crearon configuraciones cortafuegos; se colocaron los cortafuegos unitarios de la figura 4.6 hasta completar 1%, 2%, 3%, 4% y 5% del total del bosque, es decir, 100, 200, 300, 400 y 500 celdas respectivamente. Para cada uno de los porcentajes existen dos diseños posibles *Interleaved* y *Aligned*, los cuales tienen relación con la disposición espacial de los cortafuegos unitarios entre sí. Para generar una configuración de cortafuegos, se debe elegir una figura de cortafuego (5x12x5, 7x8x7, 4x8x4, Hat, Cross, 5x7x5x7, 10-0-10, 10-1-10, 4-2-12-2-4), un porcentaje de cortafuego (1%, 2%, 3%, 4%, 5%) y un diseño (*Interleaved*, *Aligned*). Por ejemplo, todas las configuraciones con la figura 5x12x5 se muestran en la figura 4.8.

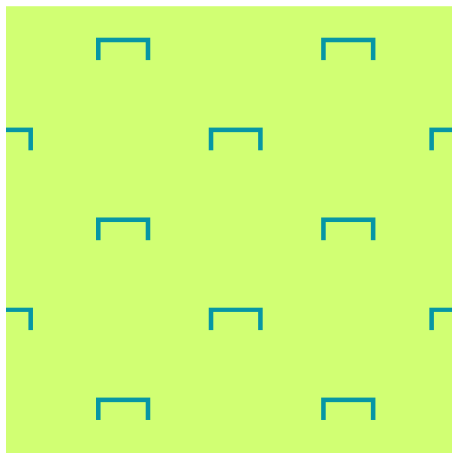
Figura 4.8: Example of 5x12x5 configurations



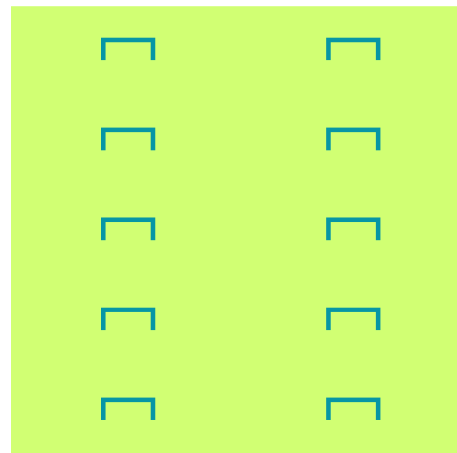
(a) 5x12x5 - 1% - Interleaved



(b) 5x12x5 - 1% - Aligned

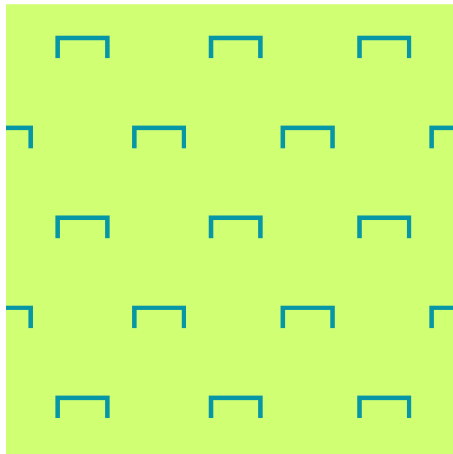


(c) 5x12x5 - 2% - Interleaved

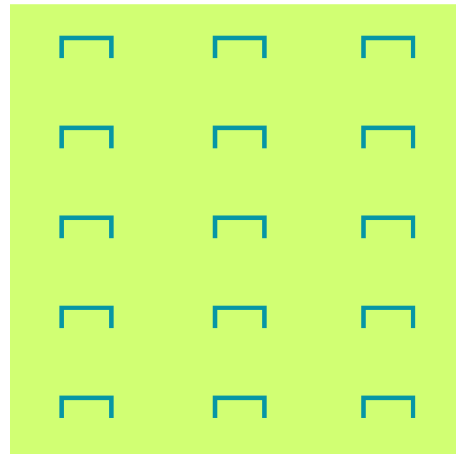


(d) 5x12x5 - 2% - Aligned

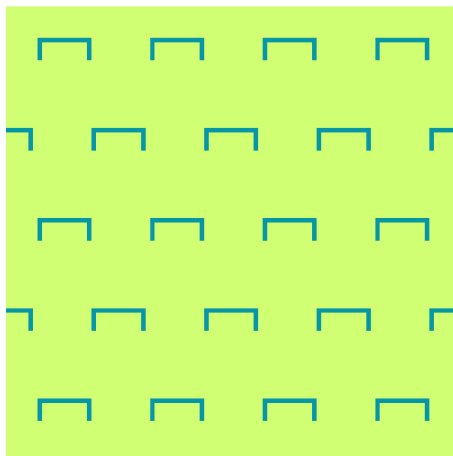
Figura 4.8: Example of 5x12x5 configurations



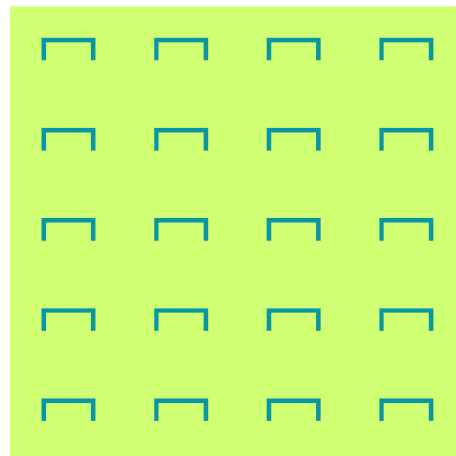
(e) 5x12x5 - 3% - Interleaved



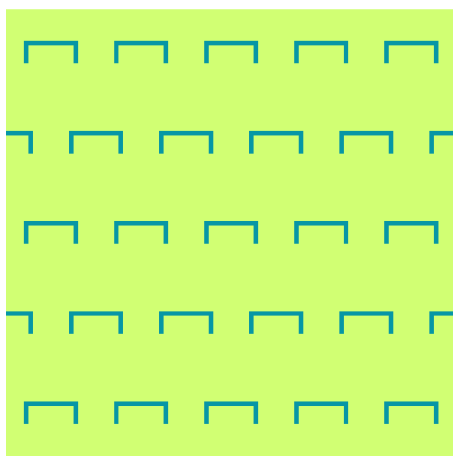
(f) 5x12x5 - 3% - Aligned



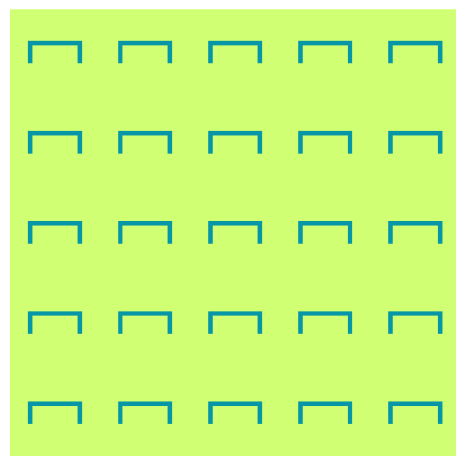
(g) 5x12x5 - 4% - Interleaved



(h) 5x12x5 - 4% - Aligned



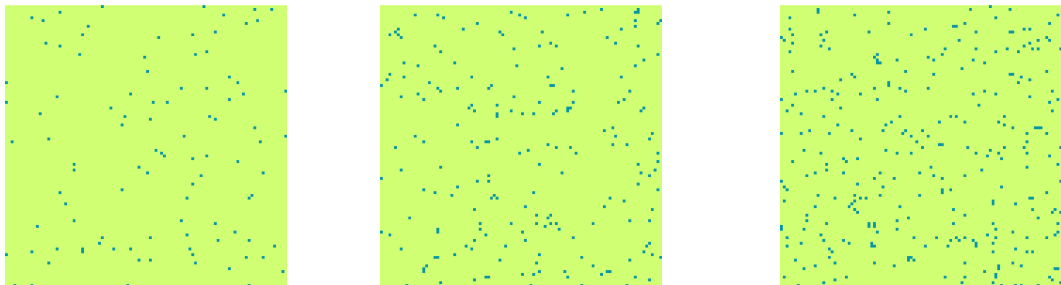
(i) 5x12x5 - 5% - Interleaved



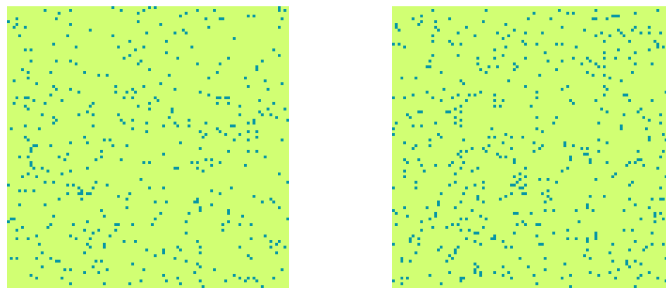
(j) 5x12x5 - 5% - Aligned

Para ver todas las posibles configuraciones por porcentaje total de cortafuego ver las figuras A.1, A.2, A.3, A.4 y A.5 en el Anexo A. Para facilitar la visualización de las configuraciones solo se muestran en el bosque *Homogeneous C1*, siendo replicadas estas configuraciones sobre los otros 3 bosques.

Con el fin de poder comparar los rendimientos entre las distintas configuraciones, se crearon 5 configuraciones aleatorias, 1 para cada nivel de porcentaje de cortafuego. Las configuraciones aleatorias se muestran en la figura 4.9 sobre un bosque *Homogeneous C1*, siendo replicadas sobre los otros 3 tipos de bosques.



(a) Random - 1% - Random (b) Random - 2% - Random (c) Random - 3% - Random



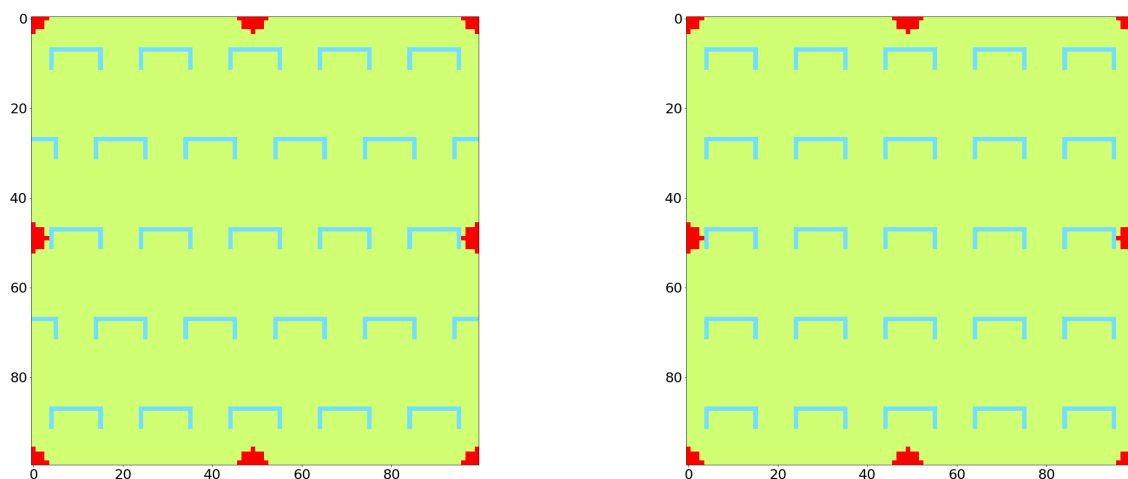
(d) Random - 4% - Random (e) Random - 5% - Random

Figura 4.9: Fuelbreak configurations with randomization.

4.3. Puntos de ignición

Para las simulaciones se seleccionaron 8 puntos de ignición distintos, estos puntos están ubicados en los bordes de cada uno de los 4 bosques, específicamente en las 4 esquinas y 4 puntos medios. El número de celda de estos puntos son 1, 50, 100, 4.901, 5.000, 9.901, 9.950 y 10.000. Se tomo el supuesto de que el bosque esta inserto en una interfaz urbano-rural (IUR) y los incendios son provocados desde afuera hacia dentro de cada uno de los bosques.

Sobre cada uno de estos 8 puntos se agrego una aleatoriedad de una distancia euclidiana de 3 celdas. Un ejemplo de esto se ve en las figuras 4.10a y 4.10b, en donde las celdas en rojo indican los posibles puntos de ignición.



(a) Ignition points in 5x12x5 - 3% - Interleaved (b) Ignition points in 5x12x5 - 3% - Aligned

Figura 4.10: Example of possible ignition points

4.4. Clima

Los escenarios meteorológicos incluyen observaciones horarias de la temperatura, la humedad relativa, la velocidad y dirección el viento, así como también los valores asociados al *Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System*, el cual consta de 6 componentes (calculadas en base a la observación de las 4 variables anteriores) que consideran los efectos de la humedad del combustible y las condiciones meteorológicas en el comportamiento del fuego. Para los valores de estas variables meteorológicas se consideraron condiciones climáticas extremas de la región de Alberta, manteniéndose constante todas las variables excepto la dirección del viento.

La dirección del viento es estocástica y esta centrada hacia el centro del bosque desde cada uno de los 8 puntos de ignición mencionados en la sección anterior, con 3 posibles aberturas de dirección del viento, 30° , 60° , 90° . En las figuras 4.11a, 4.11b y 4.11c se puede visualizar la abertura de 30° , 60° y 90° de la dirección del viento respectivamente desde la celda 9.950. Para cada una de las combinaciones punto de ignición (1, 50, 100, 4.901, 5.000, 9.901, 9.950 y 10.000) y abertura dirección del viento (30° , 60° , 90°) se simuló 100 incendios de 8 horas cada uno, en donde para cada una de las 100 simulaciones se escoge al azar una dirección de viento, dentro de su abertura correspondiente, constante para las 8 horas simuladas. Se simuló 8 horas de incendio ya que al ser condiciones extremas, en 8 horas el incendio ya logra llegar al centro del bosque.

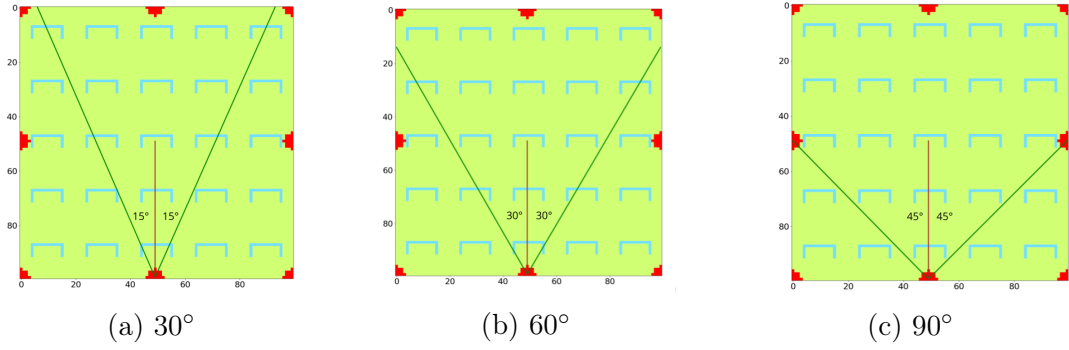


Figura 4.11: Example of wind direction opening from cell 9.950.

Finalmente, para cada configuración de cortafuego sobre cada uno de los bosques se simularon 2.400 simulaciones en total, dada las especificaciones mencionadas. Lo que genera un total de 912.000 simulaciones (2.400 x 4 bosques x 5 porcentajes x 19 configuraciones)

Capítulo 5

Resultados y Análisis

Los resultados de las simulaciones se muestran por bosque (*Heterogeneous NF*, *Heterogeneous C1*, *Heterogeneous O1b*, *Homogeneous C1*) y por porcentaje de cortafuego (1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %) en el Anexo B (desde la tabla B.1 hasta la tabla B.20). En cada una de las tablas aparece el promedio, desviación estándar, máximo, mínimo y mediana del número de celdas quemadas después de las simulaciones; los resultados están ordenados de menor a mayor según el promedio de celdas quemadas y se destaca la posición de la configuración aleatoria.

Por ejemplo, en la tabla B.8 aparecen los resultados de la combinación *Heterogeneous C1* - 3%. En esta se puede observar que la configuración aleatoria se ubica en el lugar 18, de 19 configuraciones posibles, con 1062 celdas quemadas en promedio; en el primer y segundo lugar se ubica el cortafuego 5x12x5 en sus dos diseños *Interleaved* y *Aligned* con 881 y 885 celdas quemadas en promedio respectivamente.

Para el análisis de los resultados se analizará, en cada uno de las combinaciones (bosque - porcentaje), el rendimiento de la configuración aleatoria y las configuraciones con menor promedio de celdas quemadas. Luego se analizará la influencia de la figura y del diseño en la configuración del cortafuego y por último, la influencia del porcentaje de cortafuego disponible.

5.1. Rendimiento configuración aleatoria

En la tabla 5.1 se muestra un resumen de la posición (de un total de 19) en la que se encuentra la configuración aleatoria en cada combinación bosque y porcentaje. En los 4 bosques se logra evidenciar que mientras más porcentaje de cortafuego peor rendimiento tiene la configuración aleatoria con respecto a las demás; también se evidencia en los 4 bosques que desde 1 % a 2 % la posición de la configuración aleatoria se encuentra entre 8 y 12, mientras

que desde 3 % a 5 % la posición cae estando entre la posición 14 y 18, reafirmando lo anterior. Por lo tanto, los resultados indican que tiene sentido pensar configuraciones de cortafuegos y no dejar al azar la forma y posición de estos, siendo aun más notorio mientras aumenta el porcentaje disponible de cortafuegos.

Tabla 5.1: Random configuration rank out of 19 configurations

Forest	Percentage	# rank	Forest	Percentage	# rank
Heterogeneous NF	1 %	8	Heterogeneous O1b	1 %	9
	2 %	9		2 %	12
	3 %	15		3 %	17
	4 %	14		4 %	15
	5 %	17		5 %	17
Heterogeneous C1	1 %	9	Homogeneous C1	1 %	10
	2 %	10		2 %	9
	3 %	18		3 %	17
	4 %	15		4 %	15
	5 %	17		5 %	17

5.2. Configuraciones con menor promedio de celdas quemadas

A continuación se analizará que configuración tiene el menor promedio de celdas quemadas, es decir, el mejor rendimiento, con el objetivo de saber si hay alguna tendencia sobre la forma del cortafuego o en el diseño de este.

En la tabla 5.2 se muestra la mejor configuración (*fuelbreak - layout*) y su variación porcentual con respecto a la configuración aleatoria en cada combinación (*forest - percentage*).

Se logra evidenciar que hay una gran tendencia de la figura 5x12x5, ocupando el primer lugar en 16 escenarios, independiente de su diseño. La configuración 5x12x5-*Interleaved* ocupa el primer lugar 11 veces y 5x12x5-*Aligned* 6 veces, compartiendo el primer lugar en la combinación *Heterogeneous O1b* - 3 %. Las otras configuraciones que ocupan el primer lugar son *Cross-Aligned* 2 veces, *Cross-Interleaved* 1 vez y *7x8x7-Aligned* 1 vez. Los 3 cortafuegos que ocupan los primeros lugares tienen forma cóncava, siendo este el primer acercamiento de la influencia de la figura de los cortafuegos en la disminución del impacto del incendio.

Por otro lado, el promedio de variación porcentual entre los 4 bosques para 1 %, 2 %, 3 %, 4 % y 5 % es -10.13 %, -5.21 %, -16.55 %, -20.81 % y -35.26 % respectivamente. Se evidencia

que mientras más porcentaje de cortafuego disponible mayor es la disminución de celdas quemadas con respecto a la configuración aleatoria, por lo tanto, esto permite reafirmar que mientras existan celdas disponibles para cortafuegos tiene sentido pensar en la figura y posición de los cortafuegos versus dejar esta decisión al azar, siendo más beneficiosa esta decisión mientras más celdas disponibles para cortafuegos existan. Esta tendencia no se cumple en 2 % de cortafuegos teniendo una disminución con respecto a la variación porcentual de 1 % de cortafuegos, aun así existe un beneficio con respecto a la configuración aleatoria.

Tabla 5.2: The best fuelbreak configuration and percentage variation with respect to random configuration per scenario

Forest	Percentage	fuelbreak-layout	% variation	Forest	Percentage	fuelbreak-layout	% variation
Heterogeneous NF	1 %	5x12x5-Aligned	-8.35 %	Heterogeneous O1b	1 %	5x12x5-Aligned	-10.37 %
	2 %	Cross-Aligned	-3.62 %		2 %	Cross-Interleaved	-6.95 %
	3 %	Cross-Aligned	-14.05 %		3 %	5x12x5-Aligned 5x12x5-Interleaved	-17.02 %
	4 %	5x12x5-Interleaved	-15.28 %		4 %	5x12x5-Interleaved	-20.69 %
	5 %	5x12x5-Interleaved	-32.54 %		5 %	5x12x5-Interleaved	-35.18 %
Heterogeneous C1	1 %	5x12x5-Aligned	-10.97 %	Homogeneous C1	1 %	5x12x5-Aligned	-10.84 %
	2 %	7x8x7-Aligned	-3.26 %		2 %	5x12x5-Aligned	-6.99 %
	3 %	5x12x5-Interleaved	-17.04 %		3 %	5x12x5-Interleaved	-18.10 %
	4 %	5x12x5-Interleaved	-20.02 %		4 %	5x12x5-Interleaved	-27.26 %
	5 %	5x12x5-Interleaved	-34.01 %		5 %	5x12x5-Interleaved	-39.31 %

5.3. Influencia de la figura y diseño de la configuración

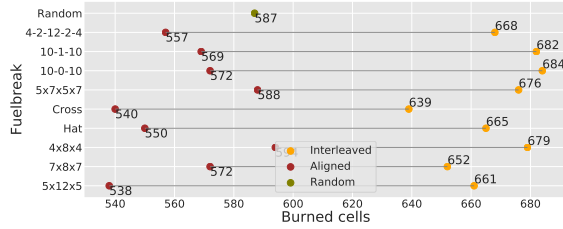
A continuación se analizará la influencia de las figuras (5x12x5, 7x8x7, 4x8x4, Hat, Cross, 5x7x5x7, 10-0-10, 10-1-10, 4-2-12-2-4) y los diseños *Interleaved* y *Aligned* dentro de las configuraciones de cortafuegos. Para esto se crearon los gráficos de las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 las cuales muestran el promedio de celdas quemadas, para los 4 bosques, en los 5 niveles de porcentaje de cortafuegos (1 %, 2 %, 3 %, 4 % y 5 % respectivamente).

En las configuraciones de 1 % de cortafuegos (ver 5.1) se ve observa que en los 4 bosques, todas las configuraciones con diseño *Aligned* y la configuración aleatoria, están agrupadas a la izquierda, lo que representa un menor promedio de celdas quemadas, por otro lado, todas las configuraciones *Interleaved* están agrupadas a la derecha con un mayor promedio de celdas quemadas. Dentro del grupo de la izquierda las figuras 5x12x5, Cross, 7x8x7, Hat y 4-2-12-2-4 son las que poseen menor promedio de celdas quemadas, a diferencia de la configuración aleatoria que tiene el mayor promedio de celdas quemadas dentro de este grupo, a pesar de esto la configuración aleatoria sigue siendo una mejor opción que las configuraciones con diseño *Interleaved*.

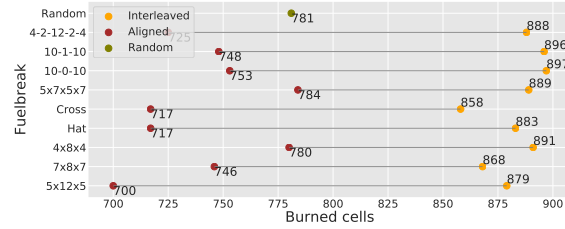
Analizando la figura A.1 (en el Anexo A) tiene sentido que el diseño *Aligned* tenga un mejor rendimiento cuando hay 1 % de cortafuego disponible, ya que las figuras de cortafuegos permiten crear una barrera en la mitad del bosque, en cambio, en el diseño *Interleaved* las figuras de cortafuegos quedan distantes entre sí, dejando caminos para el crecimiento del

incendio.

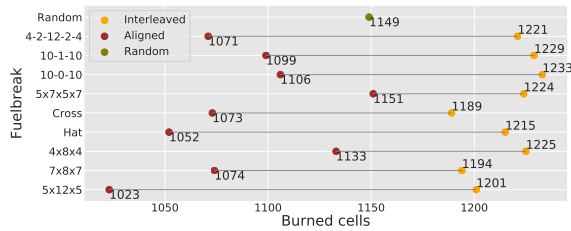
Figura 5.1: Mean number of burned cells in forests with 1% fuelbreaks



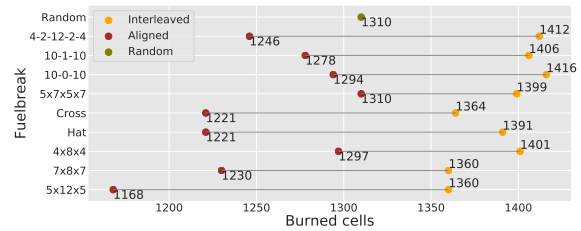
(a) Heterogeneous NF - 1%



(b) Heterogeneous O1b - 1%

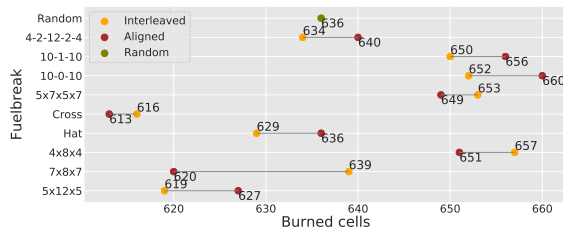


(c) Heterogeneous C1 - 1%

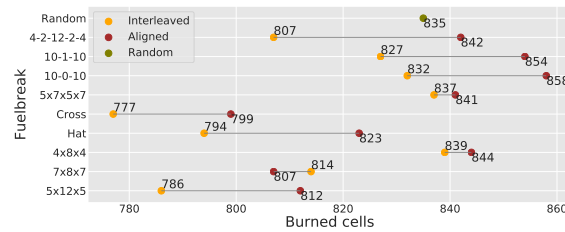


(d) Homogeneous C1 - 1%

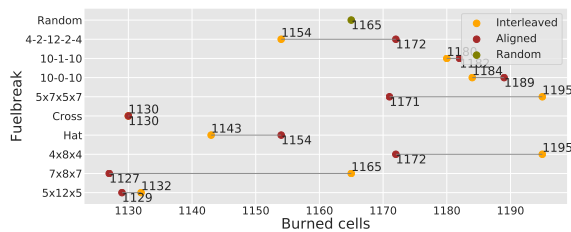
Figura 5.2: Mean number of burned cells in forests with 2% fuelbreaks



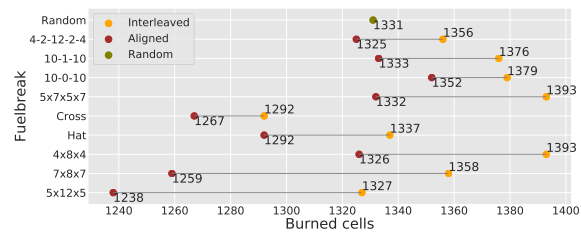
(a) Heterogeneous NF - 2%



(b) Heterogeneous O1b - 2%



(c) Heterogeneous C1 - 2%

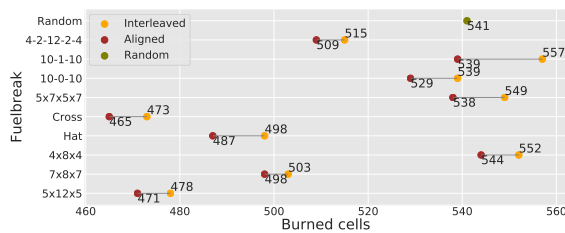


(d) Homogeneous C1 - 2%

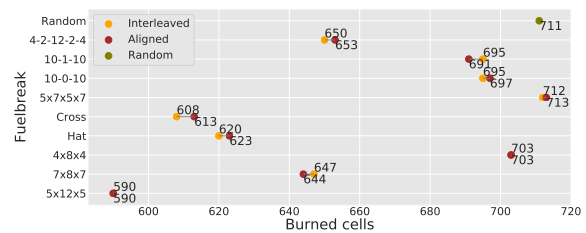
En las configuraciones de 2% de cortafuegos (ver 5.2) se observa que en los 4 bosques las configuraciones con las figuras 5x12x5, Cross, 7x8x7 y Hat tienen los mejores rendimientos con un menor promedio de celdas quemadas. En los bosques *Heterogeneous NF* (ver 5.2a) y *Heterogeneous C1* (ver 5.2c) no hay una tendencia clara entre el diseño de la configuración. En el bosque *Heterogeneous O1b* (ver 5.2b) se observa que el diseño *Interleaved* tiene menor promedio de celdas quemadas a figura de configuración constante (excepto para la figura 7x8x7), a diferencia del bosque *Homogeneous C1* (ver 5.2d) en donde el diseño *Aligned* tiene menor promedio de celdas quemadas a figura de configuración constante.

En las configuraciones de 3% de cortafuego (ver 5.3) se observa nuevamente que las configuraciones con las figuras 5x12x5, Cross, 7x8x7 y Hat tienen un menor promedio de celdas quemadas. En los bosques *Heterogeneous C1* (ver 5.3c) y *Homogeneous C1* (ver 5.3d) se observa que el diseño *Interleaved* tiene un menor promedio de celdas quemadas a figura constante, en el caso del bosque *Heterogeneous NF* (ver 5.3a) el diseño *Aligned* tiene un menor promedio de celdas quemadas a figura constante y en el bosque *Heterogeneous O1b* (ver 5.3b) no hay una tendencia sobre el diseño.

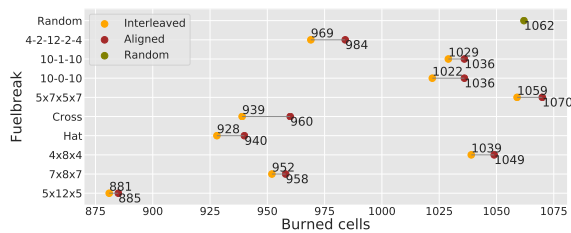
Figura 5.3: Mean number of burned cells in forests with 3% fuelbreaks



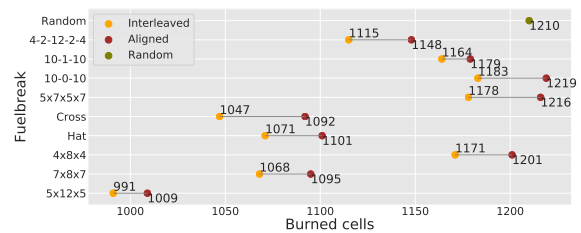
(a) Heterogeneous NF - 3%



(b) Heterogeneous O1b - 3%



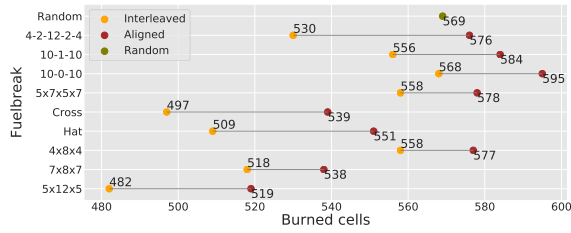
(c) Heterogeneous C1 - 3%



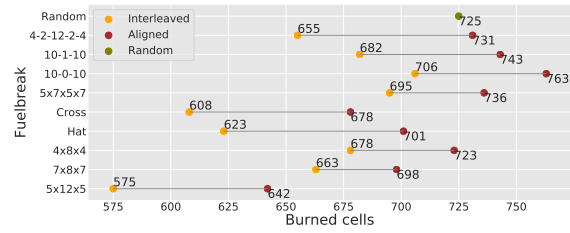
(d) Homogeneous C1 - 3%

En las configuraciones de 4% y 5% de cortafuegos (ver 5.4 y 5.5) tienen un comportamiento similar. En ambos el diseño *Interleaved* tiene un menor promedio de celdas quemadas a figura constante, ocurriendo esto en los 4 bosques. También las figuras 5x12x5, Cross, 7x8x7 y Hat vuelven a posicionarse dentro de los mejores rendimientos con un menor promedio de celdas quemadas.

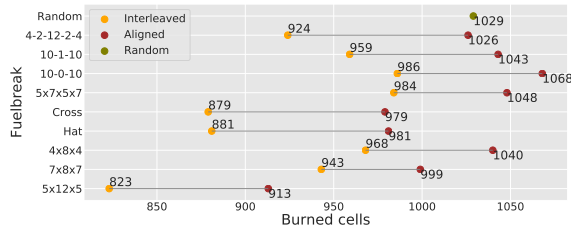
Figura 5.4: Mean number of burned cells in forests with 4% fuelbreaks



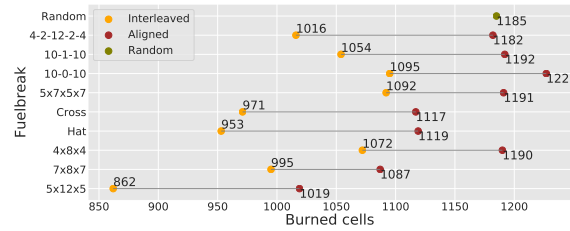
(a) Heterogeneous NF - 4%



(b) Heterogeneous O1b - 4%

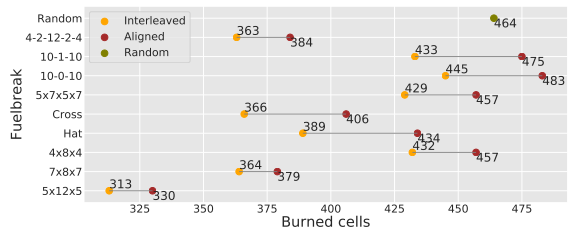


(c) Heterogeneous C1 - 4%

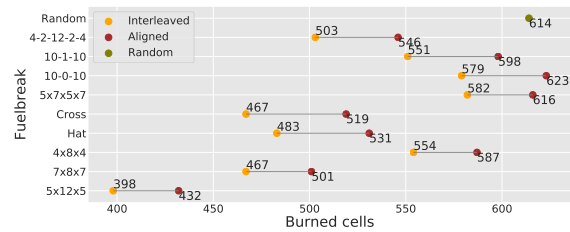


(d) Homogeneous C1 - 4%

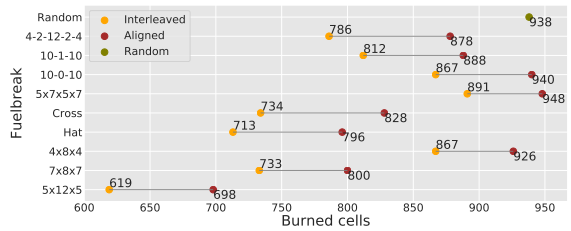
Figura 5.5: Mean number of burned cells in forests with 5% fuelbreaks



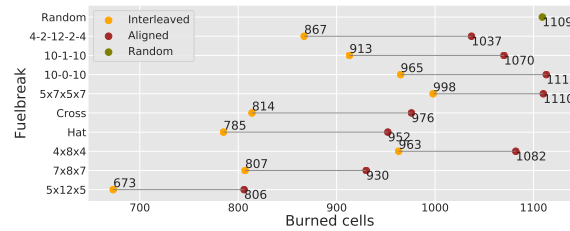
(a) Heterogeneous NF - 5%



(b) Heterogeneous O1b - 5%



(c) Heterogeneous C1 - 5%



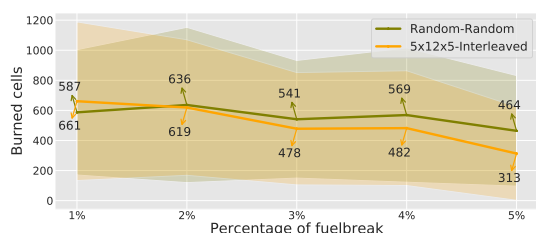
(d) Homogeneous C1 - 5%

5.4. Influencia del porcentaje total de cortafuegos

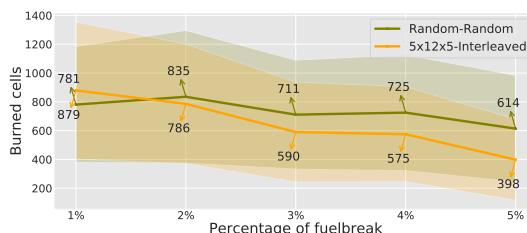
A continuación se analizará la influencia del porcentaje de cortafuego dentro de las configuraciones 5x12x5 - *Interleaved* y 5x12x5 - *Aligned*, las cuales tuvieron los mejores rendimientos. Para esto se crearon los gráficos de la figura 5.6 que muestran el promedio \pm desviación estándar de las celdas quemadas en los 5 niveles de porcentaje de cortafuegos (1%, 2%, 3%, 4% y 5%) para cada uno de los 4 bosques, siendo comparado en cada caso con la configuración aleatoria respectiva.

En las figuras 5.6a, 5.6b, 5.6c y 5.6d se muestra la configuración 5x12x5 - *Interleaved* en los bosques *Heterogeneous NF*, *Heterogeneous O1b*, *Heterogeneous C1* y *Homogeneous C1* respectivamente. En estos se observa que el promedio de celdas quemadas de la configuración disminuye a medida que aumenta el porcentaje de cortafuego disponible, también se observa que desde 2% la configuración 5x12x5 - *Interleaved* tiene menor promedio de celdas quemadas que la configuración aleatoria, siendo mayor esta diferencia a medida que aumenta el porcentaje de cortafuegos disponible.

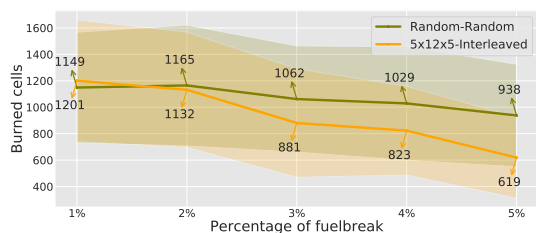
Figura 5.6: Mean \pm standard deviation of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage of the 5x12x5 fuelbreak for each of the forests



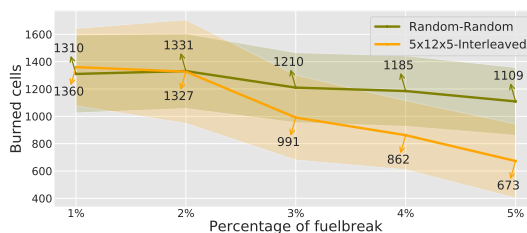
(a) 5x12x5 - Interleaved - Heterogeneous NF



(b) 5x12x5 - Interleaved - Heterogeneous O1b



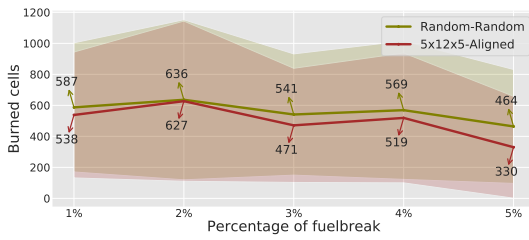
(c) 5x12x5 - Interleaved - Heterogeneous C1



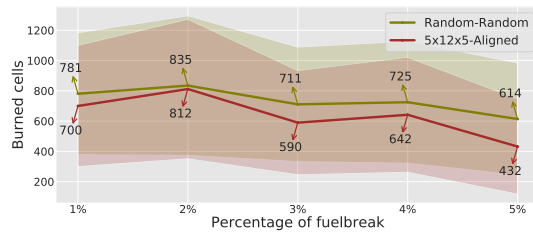
(d) 5x12x5 - Interleaved - Homogeneous C1

En figuras 5.6e, 5.6f, 5.6g y 5.6h se muestra la configuración 5x12x5 - *Aligned* en los bosques *Heterogeneous NF*, *Heterogeneous O1b*, *Heterogeneous C1* y *Homogeneous C1* respectivamente. En estos se observa que para los porcentajes 2% y 4% hay un mayor promedio de celdas quemadas que en los porcentajes 1% y 3% respectivamente. A pesar de esta subida en el promedio de celdas quemadas, si consideramos los porcentajes 1%, 3% y 5%, se obser-

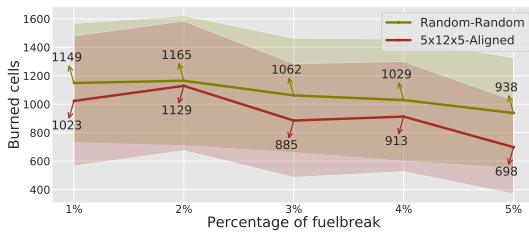
Figura 5.6: Mean \pm standard deviation of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage of the 5x12x5 fuelbreak for each of the forests



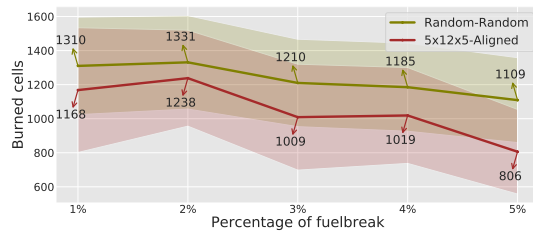
(e) 5x12x5 - Aligned - Heterogeneous NF



(f) 5x12x5 - Aligned - Heterogeneous O1b



(g) 5x12x5 - Aligned - Heterogeneous C1



(h) 5x12x5 - Aligned - Homogeneous C1

va que a medida que aumenta el porcentaje de cortafuegos disminuye el promedio de celdas quemadas. Comparando con la configuración aleatoria, en todos los casos la configuración 5x12x5 - *Aligned* tiene menor promedio de celdas quemadas, siendo mayor esta diferencia en 5%.

Capítulo 6

Discusión

Para esta sección se construyeron los gráficos de las figuras 6.1, 6.2 y 6.3, las cuales muestran los mapas de probabilidad de quema (ver ecuación 2.1) de distintas configuraciones de cortafuegos en los escenarios *Homogeneous C1 - 5%*, *Heterogeneous O1b - 5%* y *Heterogeneous C1 - 3%*, respectivamente. En base a las simulaciones realizadas, estos mapas muestran que tan probable es que se queme una celda. La probabilidad de cada celda es graficada con una tonalidad de rojo según la escala adjunta en cada gráfico. Las celdas donde se colocaron cortafuegos tienen valor 0.

En la figura 6.1 hay 4 mapas 6.1a, 6.1b, 6.1c y 6.1d que corresponden a las configuraciones 5x12x5 - *Interleaved*, 5x12x5 - *Aligned*, *Random* y 10-0-10 - *Aligned*, en el escenario *Homogeneous C1 - 5%*. De acuerdo al promedio de celdas quemadas utilizan las posiciones 1, 3, 17 y 19 respectivamente (ver tabla B.20 en Anexo B).

En la figura 6.1c se observa que los incendios simulados (desde todos los puntos de ignición ver figura 4.10b) llegan hasta el centro del bosque lo que en la figura se muestra con un rojo más intenso, es decir, las celdas poseen una mayor probabilidad de quema con un máximo de 0,5785, por lo tanto, los cortafuegos colocados al azar no oponen resistencia al paso del fuego.

En la figura 6.1d observamos que los incendios vuelven a llegar hasta el centro del bosque, pero esta vez con un rojo menos intenso. La máxima probabilidad de quema es menor que en la configuración *Random*, teniendo un valor de 0,4721. Desde los puntos de ignición ubicados en las esquinas se forman pasillos de fuego diagonales, esto también ocurre en la figura 6.1b pero con menor intensidad, en donde nuevamente el incendio llega al centro del bosque desde todos los puntos de ignición, su celda con mayor probabilidad de quema es de 0,3042.

En la figura 6.1a, la cual tiene la configuración con mejor rendimiento, no sucede lo mismo que las anteriores, ya que los incendios llegan al centro solo desde los puntos de

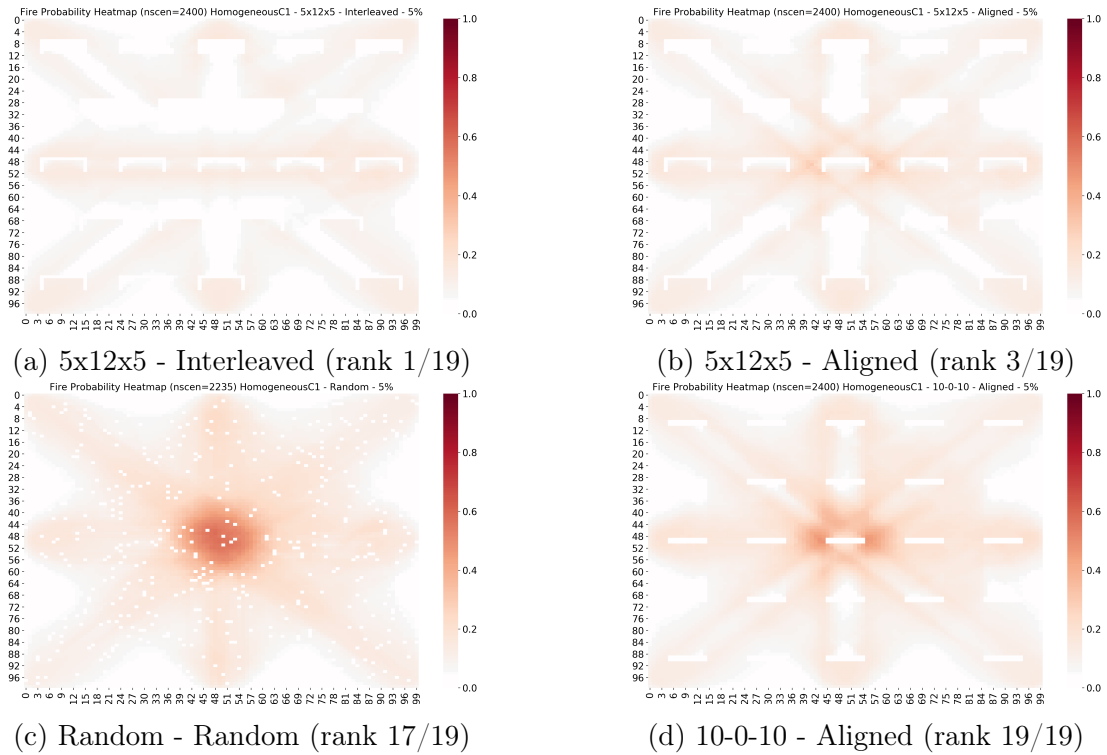


Figura 6.1: Burn Probability Map in forest Homogeneous C1 - 5%

ignición laterales (celdas 4.901 y 5.000), desde los demás puntos de ignición los incendios no logran expandirse de gran manera siendo detenidos principalmente por el cortafuego 5x12x5, sobre todo cuando el incendio impacta al cortafuego desde su lado cóncavo. Por lo tanto, la intensidad del color rojo dentro del mapa es mucho menor, en ocasiones llegando a 0 cerca del centro de bosque, la mayor probabilidad de quema es de 0,1796.

En la figura 6.2 hay 3 mapas 6.2a, 6.2b y 6.2c que corresponden a las configuraciones 5x12x5 - *Interleaved*, *Hat - Aligned* y *Random*, en el escenario *Heterogeneous O1b - 5%*. De acuerdo al promedio de celdas quemadas utilizan las posiciones 1, 9 y 17 respectivamente (ver tabla B.15 en Anexo B).

En la figura 6.2c se observa que nuevamente la configuración *Random* permite que el incendio llegue al centro del bosque, esta vez con menos intensidad comparado con 6.1c ya que en este caso los cortafuegos están sobre un bosque heterogéneo. La disposición al azar de los cortafuegos nuevamente opone nula resistencia al paso del fuego, la celda con mayor probabilidad de quema tiene un valor de 0,3087.

En las figuras 6.2a y 6.2b las celdas con mayor probabilidad de quema tienen valores de 0,1317 y 0,1517 respectivamente. En ambas figuras podemos notar que hay una menor concentración de celdas quemadas en la parte inferior del mapa, ya que el fuego impacta en lado cóncavo de ambos cortafuegos pero hay una clara ventaja del cortafuego 5x12x5 sobre

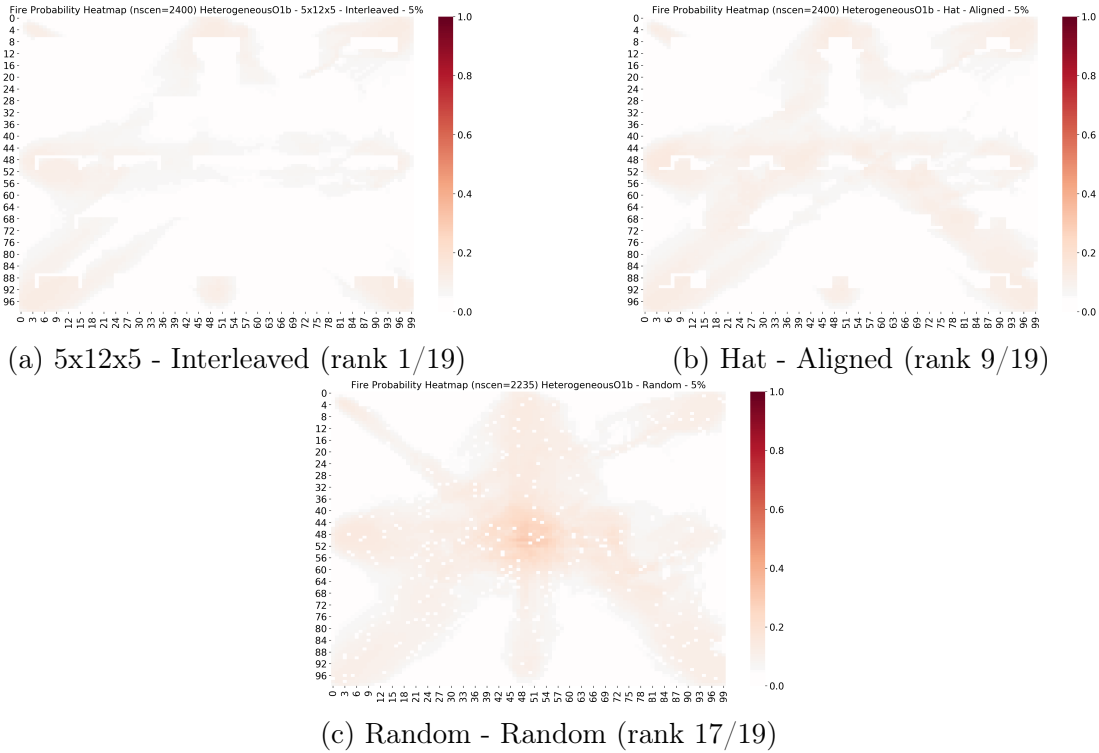


Figura 6.2: Burn Probability Map in forest Heterogeneous O1b - 5 %

Hat ya que el lado cóncavo abarca mas área lo que permite encerrar el camino del fuego y disminuir su propagación, generando una menor probabilidad de quema para cada una de las celdas como también un menor promedio de celdas quemadas.

En la figura 6.3 hay 3 mapas 6.3a, 6.3b y 6.3c que corresponden a las configuraciones 5x12x5 - *Interleaved*, 10-0-10 - *Interleaved* y *Random*, en el escenario *Heterogeneous C1* - 3%. De acuerdo al promedio de celdas quemadas utilizan las posiciones 1, 11 y 18 respectivamente (ver tabla B.8 en Anexo B).

En la figura 6.3c se observa que la configuración *Random* tiene una alta concentración de celdas quemadas en el centro del bosque, es decir, los cortafuegos oponen nula resistencia a la propagación del fuego. La celda con mayor probabilidad de quema tiene un valor de 0,4411. Por lo tanto, viendo los 3 casos de la configuración *Random* es claro que en ningún caso esta configuración logra disminuir el avance del fuego.

Si comparamos los mapas de las figuras 6.3a y 6.3b se observa que para la configuración 5x12x5 - *Interleaved* en la parte inferior del mapa hay una menor concentración de celdas quemadas a diferencia de lo que ocurre en la configuración 10-0-10 - *Interleaved* donde hay una probabilidad de celdas quemadas levemente mayor en el centro del bosque, los valores de las celdas con mayor probabilidad de quema son 0,2692 y 0,3483 respectivamente. Si bien la forma cóncava del cortafuego 5x12x5 ayuda a disminuir la propagación del fuego, no lo hace

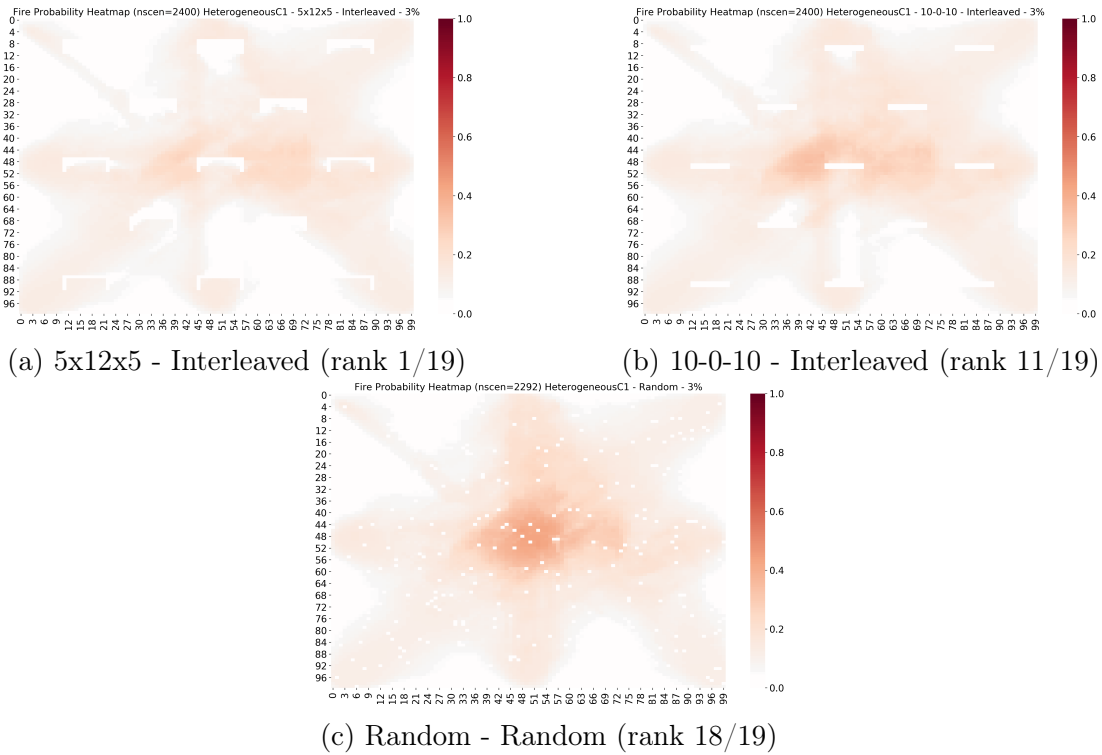


Figura 6.3: Burn Probability Map in forest Heterogeneous C1 - 3%

de la mejor forma ya que al existir un menor porcentaje total de cortafuegos (3% del bosque) hay una mayor distancia entre cada uno de los cortafuegos permitiendo una expansión libre del fuego.

Cell2Fire modela la propagación del incendio de acuerdo a la geometría de una elipse, en donde el ROS tiene 3 componentes, un componente delantero *Head Rate of Spread* (HROS), una componente lateral *Flank Rate of Spread* (FROS) y una componente trasera *Back Rate of Spread* (BROS). En base a estos valores se calcula el semieje menor, semieje mayor y la excentricidad de la elipse de propagación de incendio [Carrasco Barra, 2019]. Por lo tanto, luego de analizar los mapas de probabilidad de quema, la forma cóncava del cortafuego 5x12x5 ayuda a disminuir la componente delantera (HROS) y lateral (FROS) del ROS, lo que implica una elipse mas pequeña, es decir, una menor propagación del incendio. Cuando el incendio impacta el lado convexo también presenta ventajas ya que como se puede ver en las figuras 6.1a, 6.1b, 6.2a y 6.3a el cortafuego logra proteger el lado convexo ya que esas celdas tienen menor probabilidad de quema que las que están fuera del área cortafuego.

Capítulo 7

Conclusión

Luego del análisis de los resultados de las simulaciones, se puede confirmar que tiene sentido pensar en la disposición espacial de los cortafuegos y no dejar al azar esta tarea. Se pudo constatar que a medida que aumenta el porcentaje disponible de cortafuegos la configuración aleatoria empeora su rendimiento con respecto a las demás configuraciones creadas. El porcentaje de cortafuegos disponibles influye en la disminución de la propagación del incendio, desde un 3% la configuración aleatoria es peor que casi la totalidad de las configuraciones creadas, en cambio, a medida que aumenta el porcentaje disponible las configuraciones creadas mejoran su rendimiento. La configuración con mejor rendimiento es 5x12x5 - *Interleaved*, disminuyendo en promedio, entre los cuatro bosques, un 35.26% con respecto a la configuración aleatoria cuando hay disponible 5% de celdas para cortafuegos.

La figura y diseño del cortafuego también influyen en la disminución de la propagación del incendio. La figura 5x12x5 (ver figura 4.6a) presentó mejor rendimiento en los distintos escenarios, las figuras que le siguen en rendimiento son Cross (ver figura 4.6e), 7x8x7 (ver figura 4.6b) y Hat (ver figura 4.6d), estas figuras tienen forma cóncava lo que permite encerrar el fuego cuando el incendio impacta en ellas a diferencia de los cortafuegos con forma de líneas. Por otro lado, desde 3% a 5% de celdas disponibles para cortafuegos, el diseño *Interleaved* tiene mejor rendimiento que el diseño *Aligned*, esto se debe a que la disposición *Interleaved* evita la creación de pasillos de fuego que facilitan la propagación del incendio.

Para futuras investigaciones de posicionamiento de cortafuegos se debe considerar la utilización de metaheurísticas [Chung, 2015] o inteligencia artificial [Lauer et al., 2017] que permitan posicionar cortafuegos en base a una función objetivo como también restricciones reales de acuerdo a los bosques a intervenir. Por lo tanto, el siguiente paso en el proyecto FONDEF ID20I10137, del cual pertenece esta tesis, es posicionar la figura 5x12x5 (u otras de las figuras con mejor rendimiento) con las técnicas mencionadas teniendo como objetivo minimizar las celdas quemadas (o maximizar las celdas no quemadas) en las simulaciones de incendios forestales, lo que permitirá seguir avanzando en la creación de una herramienta

tecnológica de gestión territorial para la creación de paisajes resilientes a incendios forestales.

Bibliografía

- [Abt et al., 2015] Abt, K. L., Butry, D. T., Prestemon, J. P., and Scranton, S. (2015). Effect of fire prevention programs on accidental and incendiary wildfires on tribal lands in the united states. *International Journal of Wildland Fire*, 24(6):749–762.
- [Agee and Skinner, 2005] Agee, J. K. and Skinner, C. N. (2005). Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest ecology and management*, 211(1-2):83–96.
- [Ager et al., 2006] Ager, A., Finney, M., and McMahan, A. (2006). A wildfire risk modeling system for evaluating landscape fuel treatment strategies. In *In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 149-162*, volume 41.
- [Borqu ez Gonz alez, 2017] Borqu ez Gonz alez, R. (2017). Interfaz ciencia-políticas públicas en chile: una mirada a la investigación en cambio climático. *Revista Colombiana de Sociolog a*, 40(2):311–332.
- [Bradstock et al., 2012] Bradstock, R. A., Cary, G. J., Davies, I., Lindenmayer, D. B., Price, O. F., and Williams, R. J. (2012). Wildfires, fuel treatment and risk mitigation in australian eucalypt forests: insights from landscape-scale simulation. *Journal of Environmental Management*, 105:66–75.
- [Carrasco Barra, 2019] Carrasco Barra, J. A. (2019). *Advanced techniques in Forest Management under conditions of fire uncertainty*. PhD thesis.
- [Castillo, 2016] Castillo, M. (2016). Instituciones en chile para la defensa contra incendios de interfaz urbano-forestal. *Territorium*, (23):215–221.
- [Castillo et al., 2017] Castillo, M. E., Molina, J. R., y Silva, F. R., García-Chevesich, P., and Garfias, R. (2017). A system to evaluate fire impacts from simulated fire behavior in mediterranean areas of central chile. *Science of the total environment*, 579:1410–1418.

- [Centro de Políticas Públicas UC, 2018] Centro de Políticas Públicas UC (2018). Prevención de incendios forestales: propuestas para una mirada más efectiva e integral. *Temas de la Agenda Pública*, 13(110):1–14.
- [Chung, 2015] Chung, W. (2015). Optimizing fuel treatments to reduce wildland fire risk. *Current Forestry Reports*, 1(1):44–51.
- [Cochrane et al., 2012] Cochrane, M., Moran, C., Wimberly, M., Baer, A., Finney, M. A., Beckendorf, K., Eidenshink, J., and Zhu, Z. (2012). Estimation of wildfire size and risk changes due to fuels treatments. *International Journal of Wildland Fire*, 21(4):357–367.
- [Finney, 1998] Finney, M. A. (1998). *FARSITE, Fire Area Simulator—model development and evaluation*. Number 4. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- [Finney, 2001] Finney, M. A. (2001). Design of regular landscape fuel treatment patterns for modifying fire growth and behavior. *Forest Science*, 47(2):219–228.
- [Finney et al., 2008] Finney, M. A., Seli, R. C., McHugh, C. W., Ager, A. A., Bahro, B., and Agee, J. K. (2008). Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. *International Journal of Wildland Fire*, 16(6):712–727.
- [Galilea, 2019] Galilea, S. (2019). Cambio climático y desastres naturales: Acciones claves para enfrentar las catástrofes en Chile. *Instituto de Asuntos Públicos de la Universidad de Chile*.
- [Galilea, 2020] Galilea, S. (2020). Cambio climático y los desastres naturales: una perspectiva macroregional.
- [Gallardo et al., 2018] Gallardo, L., Barraza, F., Ceballos, A., Galleguillos, M., Huneus, N., Lambert, F., Ibarra, C., Munizaga, M., O’Ryan, R., Osses, M., et al. (2018). Evolution of air quality in Santiago: The role of mobility and lessons from the science-policy interface. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6.
- [Garay Moena et al., 2019] Garay Moena, R., Castillo, M., Tapia, R., and Vergara, J. (2019). Territorio, viviendas y áreas de incendios forestales de interfaz: localidades periurbanas en torno al gran Santiago, Chile. In *XI Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Santiago de Chile, Junio 2019*. Departament d’Urbanisme i Ordenació del Territori. Universitat Politècnica
- [González et al., 2020] González, M., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M., Pauchard, A., Hoyos, J., Cordero, L., et al. (2020). Incendios forestales en Chile: Causas, impactos y resiliencia. *Center for Climate and Resilience Research: Santiago, Chile*.

- [He et al., 1999] He, H., Mladenoff, D., and Crow, T. (1999). Object-oriented design of landis, a spatially explicit and stochastic forest landscape model. *Ecol. Modell*, 119:1–19.
- [Julio et al., 1997] Julio, G., Aguilera, R., and Pedernera, P. (1997). The kitral system. In *Proc. International Workshop on Strategic Fire Planning Systems. USDA Forest Service, Fire Research Lab., Riverside, California (100 pp.)*.
- [Lauer et al., 2017] Lauer, C. J., Montgomery, C. A., and Dietterich, T. G. (2017). Spatial interactions and optimal forest management on a fire-threatened landscape. *Forest Policy and Economics*, 83:107–120.
- [Loehle, 2004] Loehle, C. (2004). Applying landscape principles to fire hazard reduction. *Forest Ecology and management*, 198(1-3):261–267.
- [Ministerio del Medio Ambiente, 2020] Ministerio del Medio Ambiente (2020). Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile. Technical report, Gobierno de Chile.
- [Moghaddas et al., 2010] Moghaddas, J. J., Collins, B. M., Menning, K., Moghaddas, E. E., and Stephens, S. L. (2010). Fuel treatment effects on modeled landscape-level fire behavior in the northern sierra nevada. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(9):1751–1765.
- [Moghaddas and Craggs, 2007] Moghaddas, J. J. and Craggs, L. (2007). A fuel treatment reduces fire severity and increases suppression efficiency in a mixed conifer forest. *International Journal of Wildland Fire*, 16(6):673–678.
- [Moreira et al., 2020] Moreira, F., Ascoli, D., Safford, H., Adams, M. A., Moreno, J. M., Pereira, J. M., Catry, F. X., Armesto, J., Bond, W., González, M. E., et al. (2020). Wild-fire management in mediterranean-type regions: paradigm change needed. *Environmental Research Letters*, 15(1):011001.
- [Moritz et al., 2014] Moritz, M. A., Batllori, E., Bradstock, R. A., Gill, A. M., Handmer, J., Hessburg, P. F., Leonard, J., McCaffrey, S., Odion, D. C., Schoennagel, T., et al. (2014). Learning to coexist with wildfire. *Nature*, 515(7525):58–66.
- [Oliveira et al., 2016] Oliveira, T. M., Barros, A. M., Ager, A. A., and Fernandes, P. M. (2016). Assessing the effect of a fuel break network to reduce burnt area and wildfire risk transmission. *International Journal of Wildland Fire*, 25(6):619–632.
- [Pais et al., 2019] Pais, C., Carrasco, J., Martell, D. L., Weintraub, A., and Woodruff, D. L. (2019). Cell2fire: A cell based forest fire growth model. *arXiv preprint arXiv:1905.09317*.
- [Parisien et al., 2010] Parisien, M.-A., Miller, C., Ager, A. A., and Finney, M. A. (2010). Use of artificial landscapes to isolate controls on burn probability. *Landscape Ecology*, 25(1):79–93.

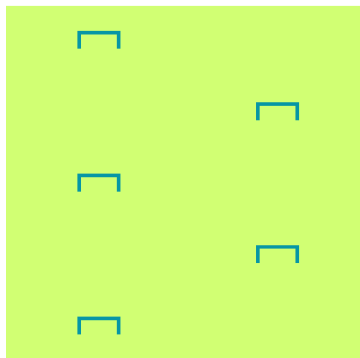
- [Pedernera et al., 2010] Pedernera, P., Castillo, M., and Julio, G. (2010). Diseño y validación de un simulador de incendios forestales en Chile.
- [Perera et al., 2002] Perera, A., Yemshanov, D., Schnekenburger, F., Weaver, K., Baldwin, D., and Boychuk, D. (2002). Boreal forest landscape dynamics simulator (bfolds): a grid-based spatially stochastic model for predicting crown fire regime and forest cover transition. *Forest Research Report*, (152).
- [Price, 2012] Price, O. F. (2012). The drivers of effectiveness of prescribed fire treatment. *Forest Science*, 58(6):606–617.
- [Shinneman et al., 2019] Shinneman, D. J., Germino, M. J., Pilliod, D. S., Aldridge, C. L., Vaillant, N. M., and Coates, P. S. (2019). The ecological uncertainty of wildfire fuel breaks: examples from the sagebrush steppe. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(5):279–288.
- [Tymstra, 2002] Tymstra, C. (2002). Prometheus: the Canadian wildland fire growth model. *Initial Attack*, 2002:8–9.
- [Úbeda and Sarricolea, 2016] Úbeda, X. and Sarricolea, P. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146:152–161.
- [Urrutia-Jalabert et al., 2018] Urrutia-Jalabert, R., González, M. E., González-Reyes, Á., Lara, A., and Garreaud, R. (2018). Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(4):e02171.
- [Wei et al., 2008] Wei, Y., Rideout, D., and Kirsch, A. (2008). An optimization model for locating fuel treatments across a landscape to reduce expected fire losses. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(4):868–877.

Anexos

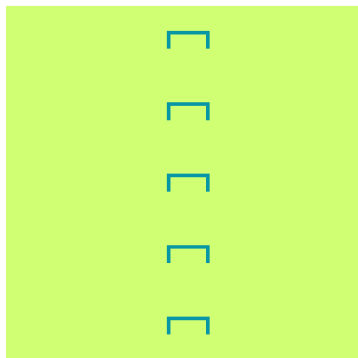
Anexo A

Configuraciones de cortafuegos

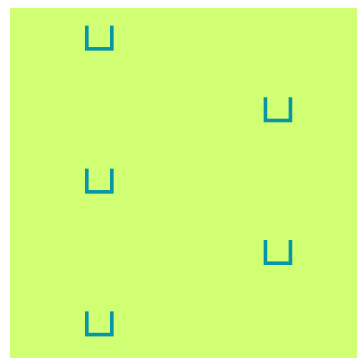
Figura A.1: Fuelbreak configurations using 1% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



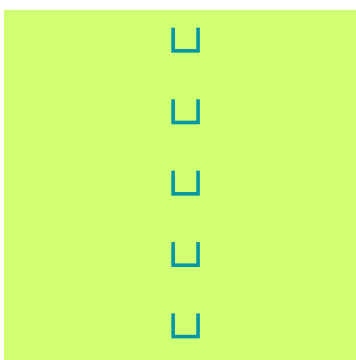
(a) 5x12x5 - 1% - Inter.



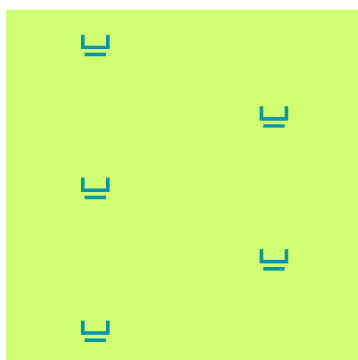
(b) 5x12x5 - 1% - Alig.



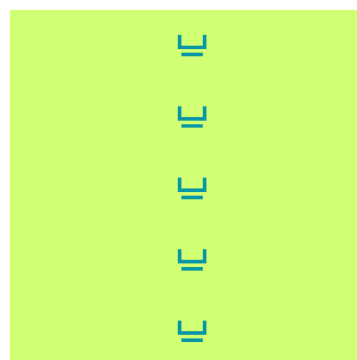
(c) 7x8x7 - 1% - Inter.



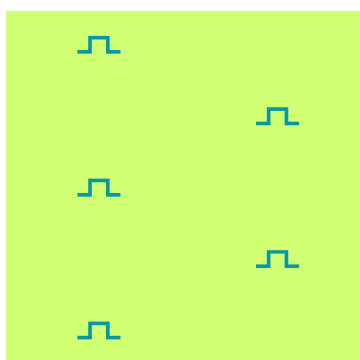
(d) 7x8x7 - 1% - Alig.



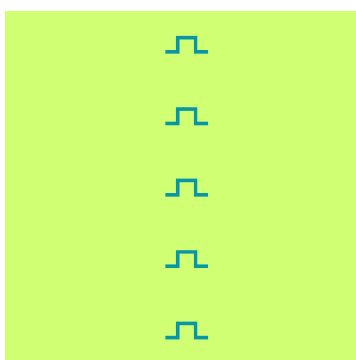
(e) 4x8x4 - 1% - Inter.



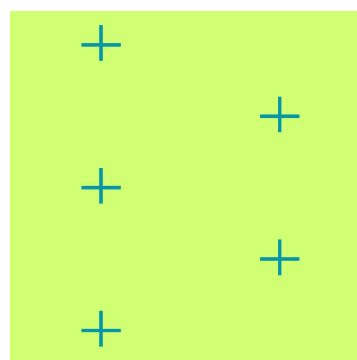
(f) 4x8x4 - 1% - Alig.



(g) Hat - 1% - Inter.

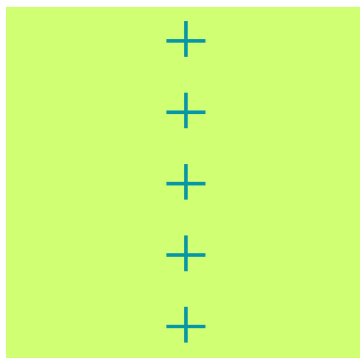


(h) Hat - 1% - Alig.

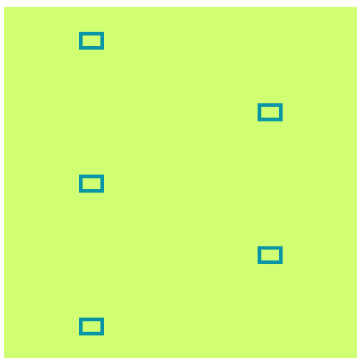


(i) Cross - 1% - Inter.

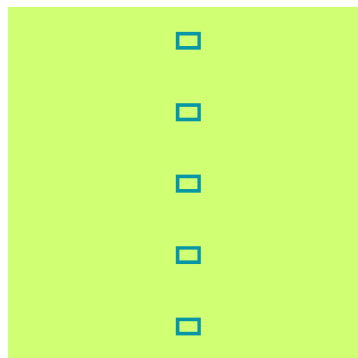
Figura A.1: Fuelbreak configurations using 1% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



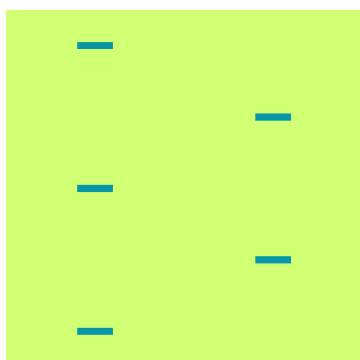
(j) Cross - 1% - Alig.



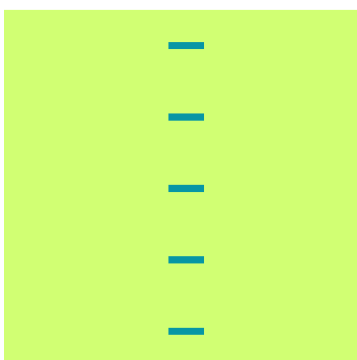
(k) 5x7x5x7 - 1% - Inter.



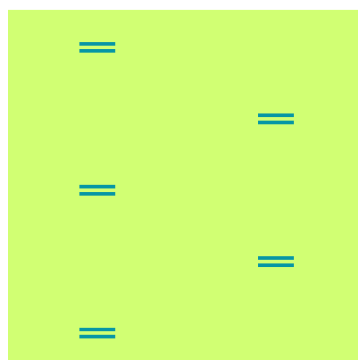
(l) 5x7x5x7 - 1% - Alig.



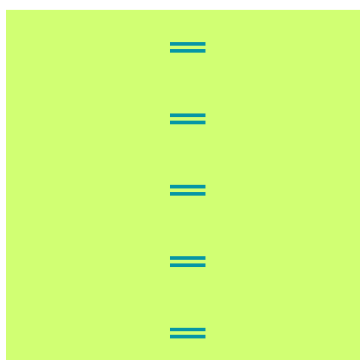
(m) 10-0-10 - 1% - Inter.



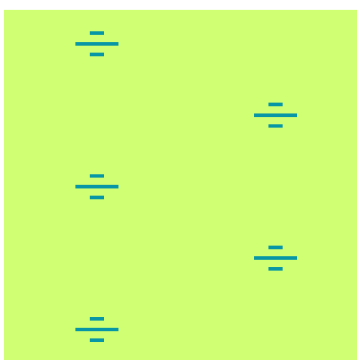
(n) 10-0-10 - 1% - Alig.



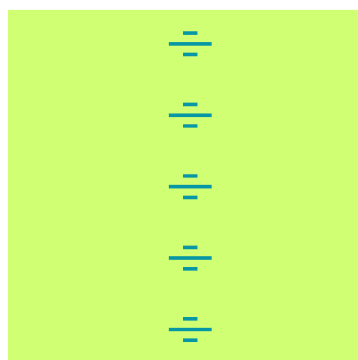
(ñ) 10-1-10 - 1% - Inter.



(o) 10-1-10 - 1% - Alig.

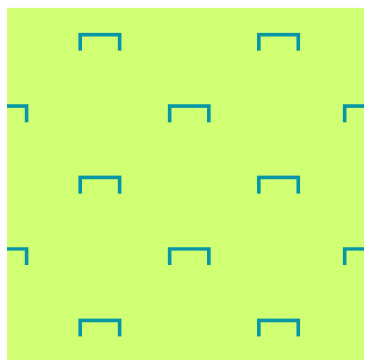


(p) 4-2-12-2-4 - 1% - Inter.

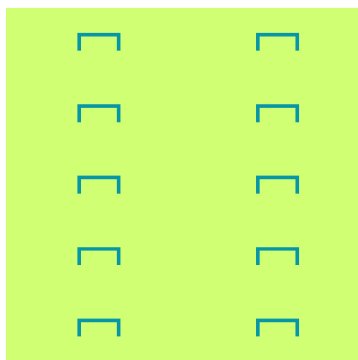


(q) 4-2-12-2-4 - 1% - Alig.

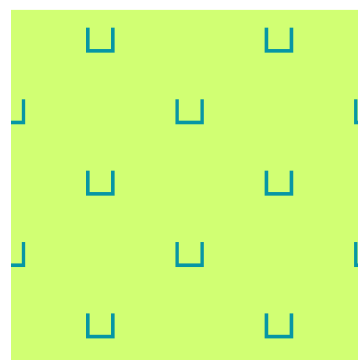
Figura A.2: Fuelbreak configurations using 2% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



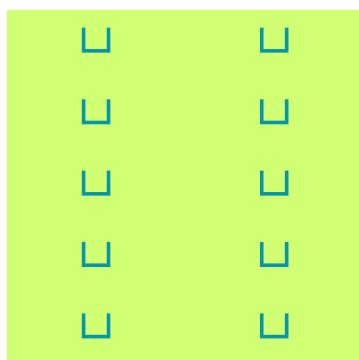
(a) 5x12x5 - 2% - Inter.



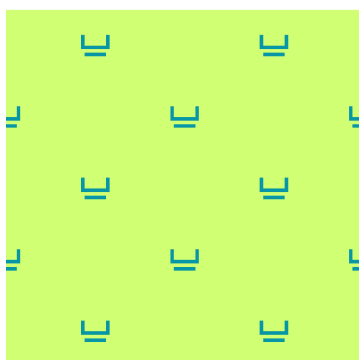
(b) 5x12x5 - 2% - Alig.



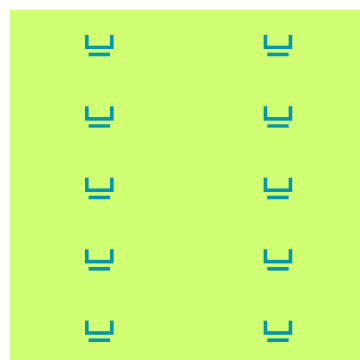
(c) 7x8x7 - 2% - Inter.



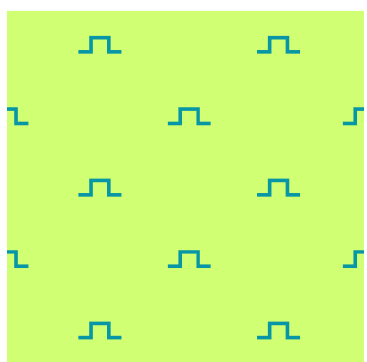
(d) 7x8x7 - 2% - Alig.



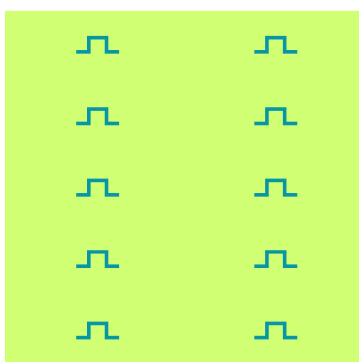
(e) 4x8x4 - 2% - Inter.



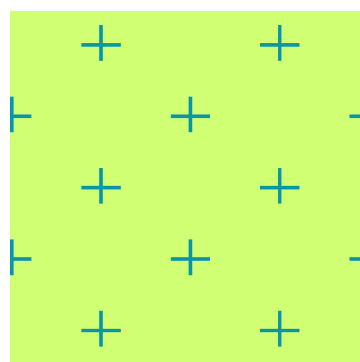
(f) 4x8x4 - 2% - Alig.



(g) Hat - 2% - Inter.

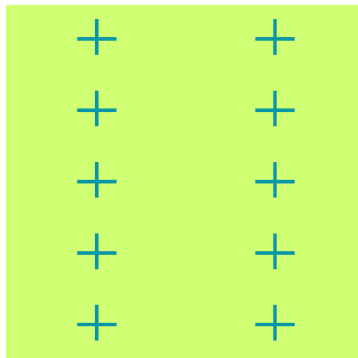


(h) Hat - 2% - Alig.

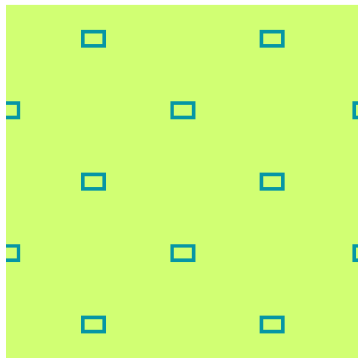


(i) Cross - 2% - Inter.

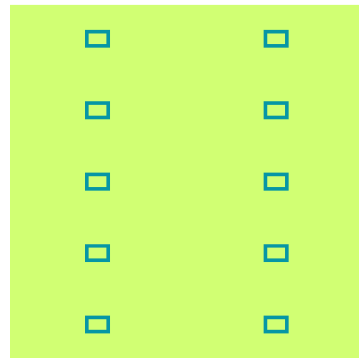
Figura A.2: Fuelbreak configurations using 2% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



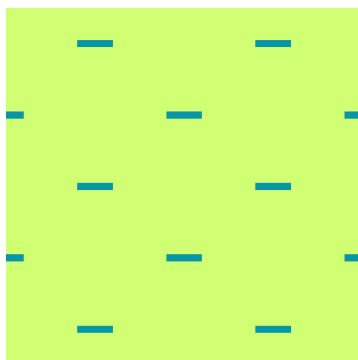
(j) Cross - 2% - Alig.



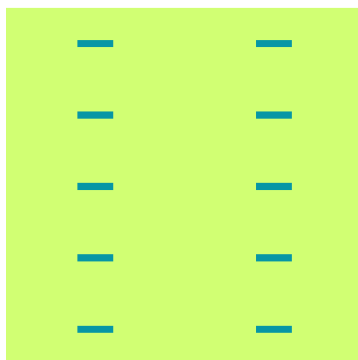
(k) 5x7x5x7 - 2% - Inter.



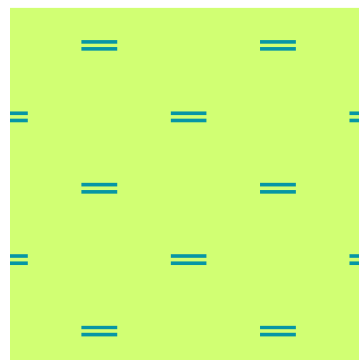
(l) 5x7x5x7 - 2% - Alig.



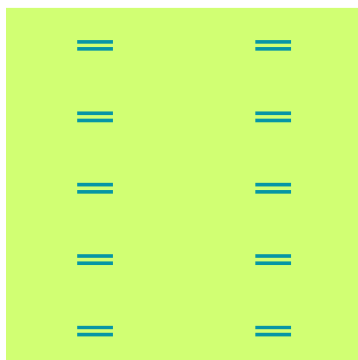
(m) 10-0-10 - 2% - Inter.



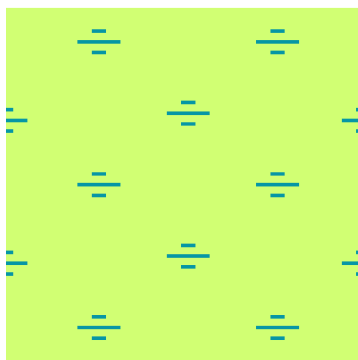
(n) 10-0-10 - 2% - Alig.



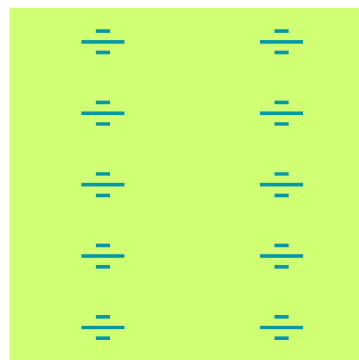
(ñ) 10-1-10 - 2% - Inter.



(o) 10-1-10 - 2% - Alig.

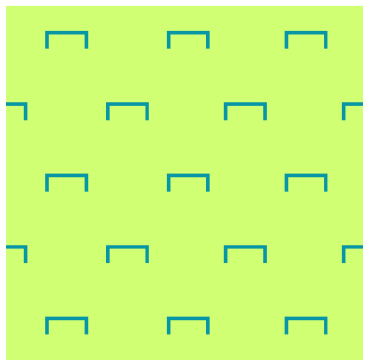


(p) 4-2-12-2-4 - 2% - Inter.

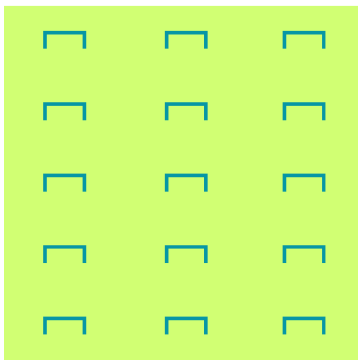


(q) 4-2-12-2-4 - 2% - Alig.

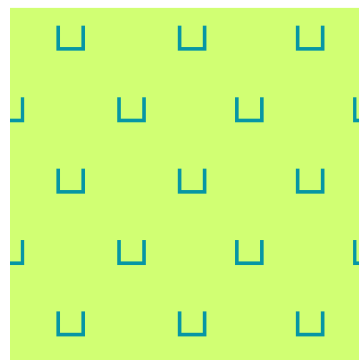
Figura A.3: Fuelbreak configurations using 3% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



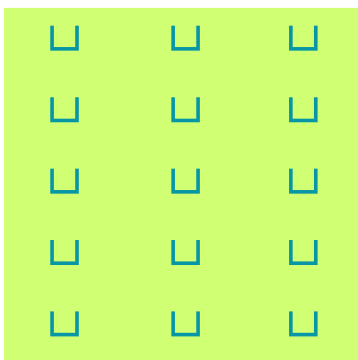
(a) 5x12x5 - 3% - Inter.



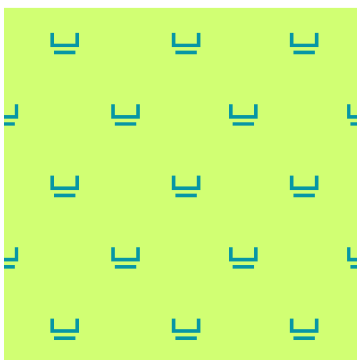
(b) 5x12x5 - 3% - Alig.



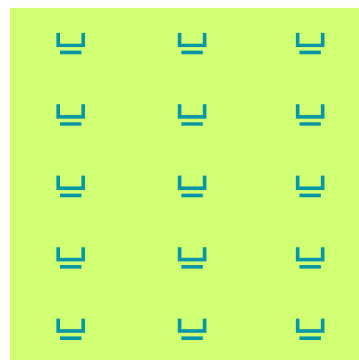
(c) 7x8x7 - 3% - Inter.



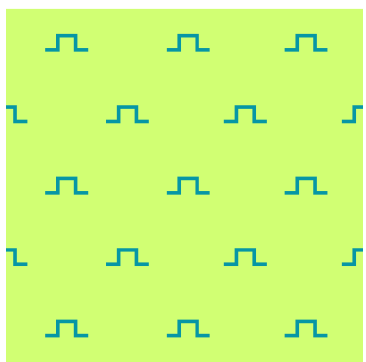
(d) 7x8x7 - 3% - Alig.



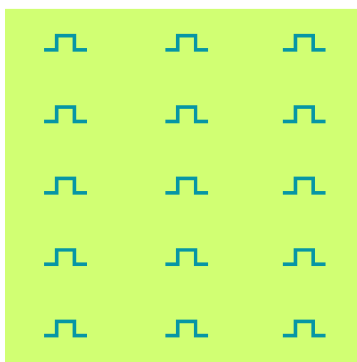
(e) 4x8x4 - 3% - Inter.



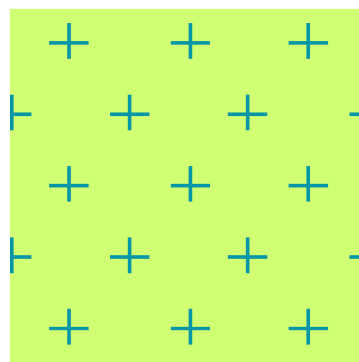
(f) 4x8x4 - 3% - Alig.



(g) Hat - 3% - Inter.

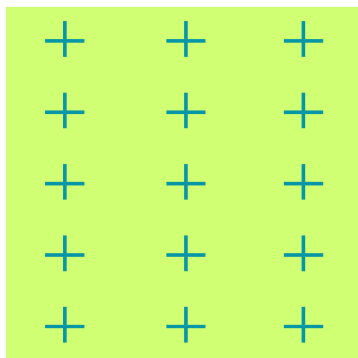


(h) Hat - 3% - Alig.

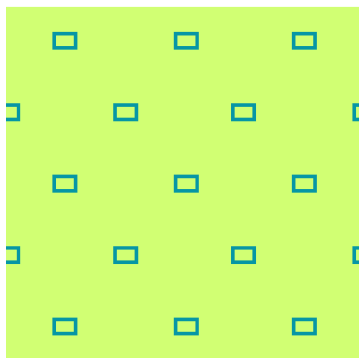


(i) Cross - 3% - Inter.

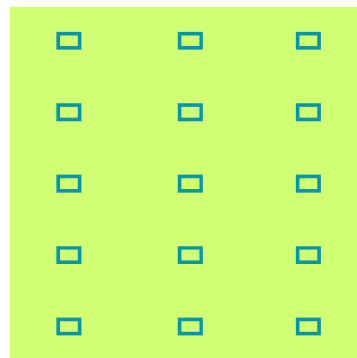
Figura A.3: Fuelbreak configurations using 3% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



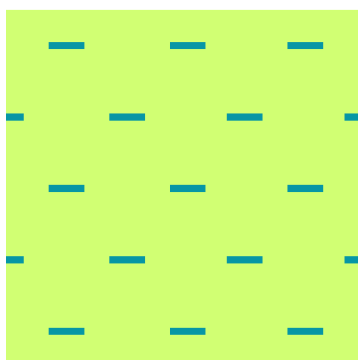
(j) Cross - 3% - Alig.



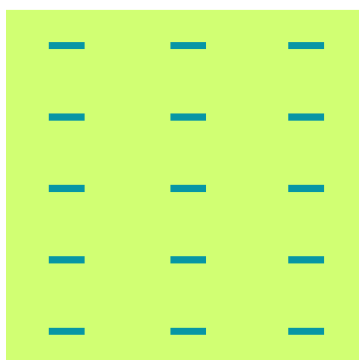
(k) 5x7x5x7 - 3% - Inter.



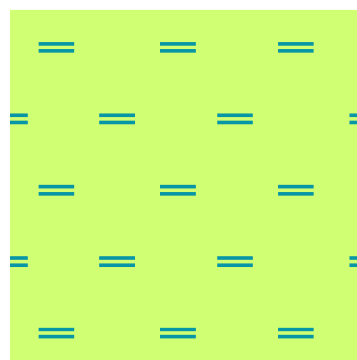
(l) 5x7x5x7 - 3% - Alig.



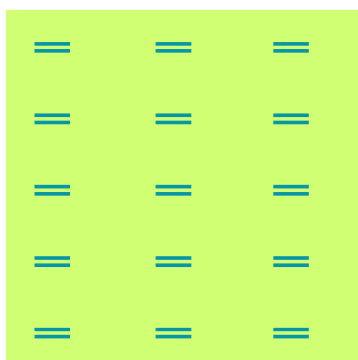
(m) 10-0-10 - 3% - Inter.



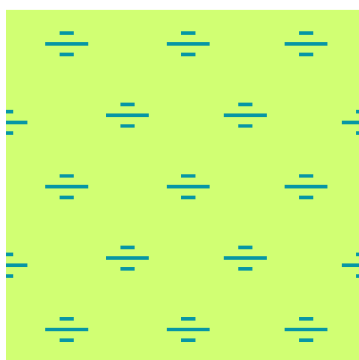
(n) 10-0-10 - 3% - Alig.



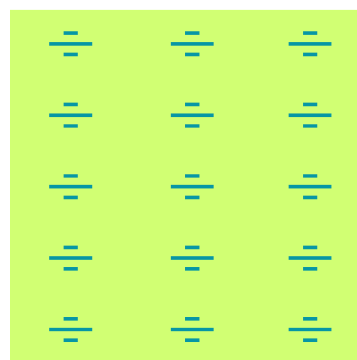
(ñ) 10-1-10 - 3% - Inter.



(o) 10-1-10 - 3% - Alig.

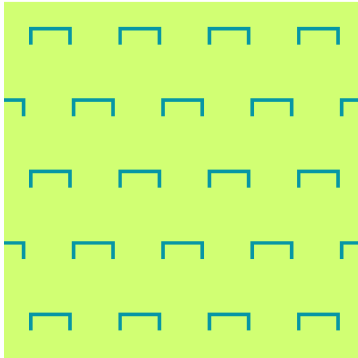


(p) 4-2-12-2-4 - 3% - Inter.

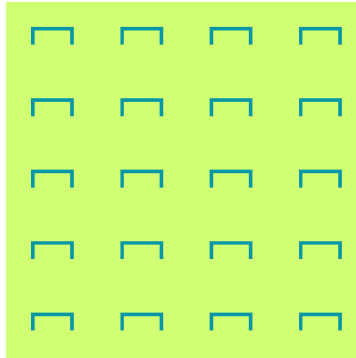


(q) 4-2-12-2-4 - 3% - Alig.

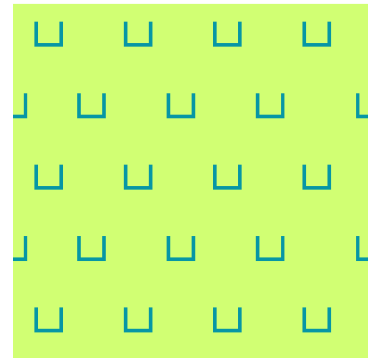
Figura A.4: Fuelbreak configurations using 4% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



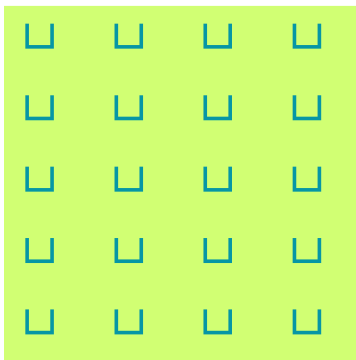
(a) 5x12x5 - 4% - Inter.



(b) 5x12x5 - 4% - Alig.



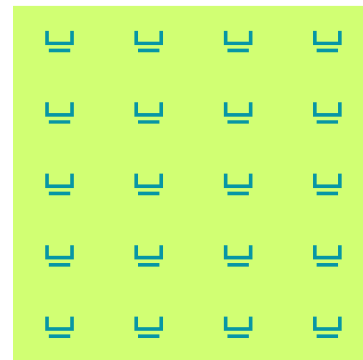
(c) 7x8x7 - 4% - Inter.



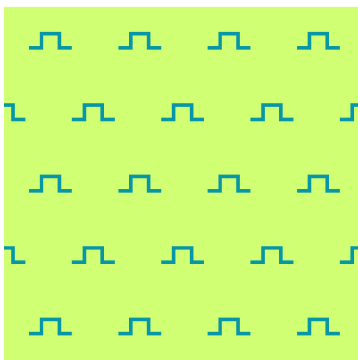
(d) 7x8x7 - 4% - Alig.



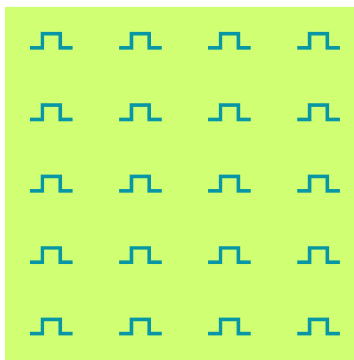
(e) 4x8x4 - 4% - Inter.



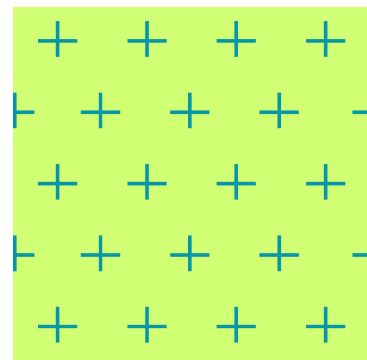
(f) 4x8x4 - 4% - Alig.



(g) Hat - 4% - Inter.

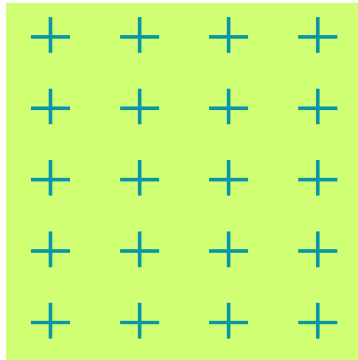


(h) Hat - 4% - Alig.

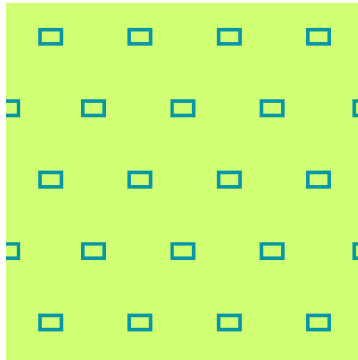


(i) Cross - 4% - Inter.

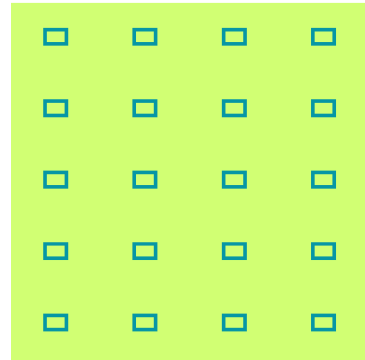
Figura A.4: Fuelbreak configurations using 4% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



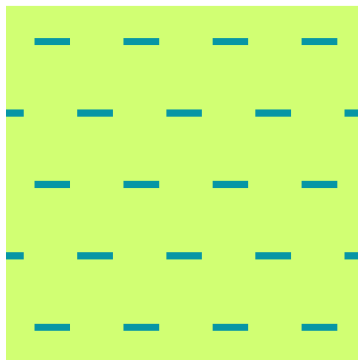
(j) Cross - 4% - Alig.



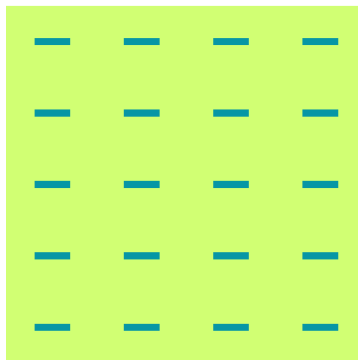
(k) 5x7x5x7 - 4% - Inter.



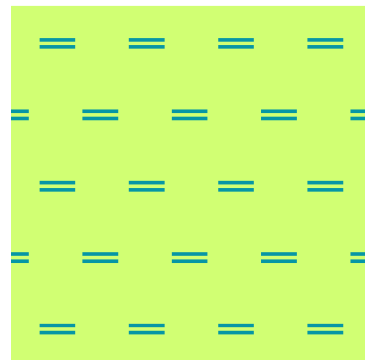
(l) 5x7x5x7 - 4% - Alig.



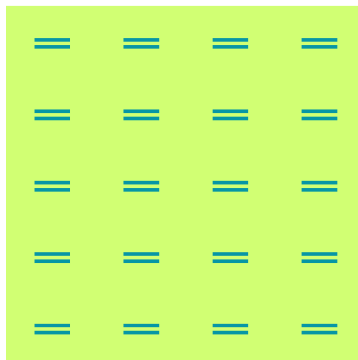
(m) 10-0-10 - 4% - Inter.



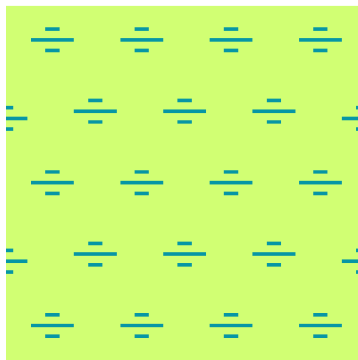
(n) 10-0-10 - 4% - Alig.



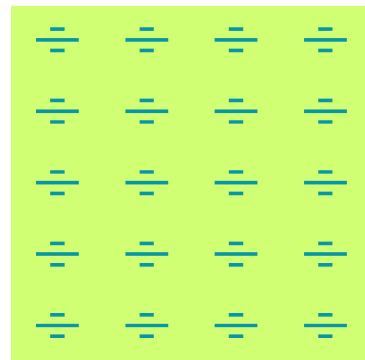
(ñ) 10-1-10 - 4% - Inter.



(o) 10-1-10 - 4% - Alig.

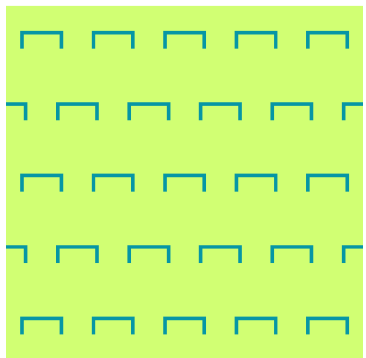


(p) 4-2-12-2-4 - 4% - Inter.

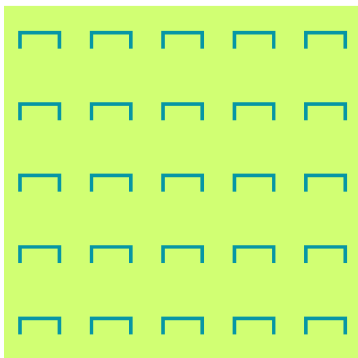


(q) 4-2-12-2-4 - 4% - Alig.

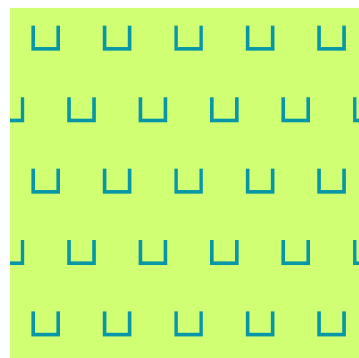
Figura A.5: Fuelbreak configurations using 5% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



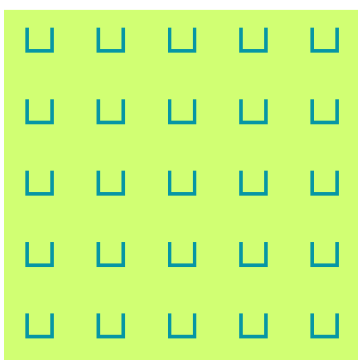
(a) 5x12x5 - 5% - Inter.



(b) 5x12x5 - 5% - Alig.



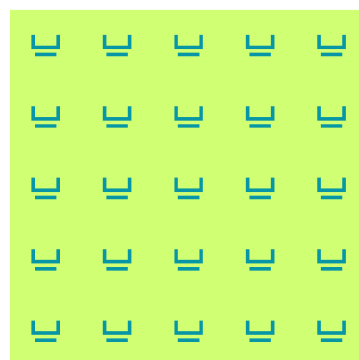
(c) 7x8x7 - 5% - Inter.



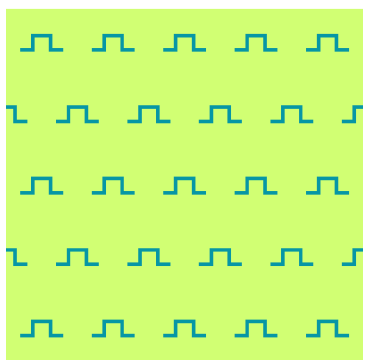
(d) 7x8x7 - 5% - Alig.



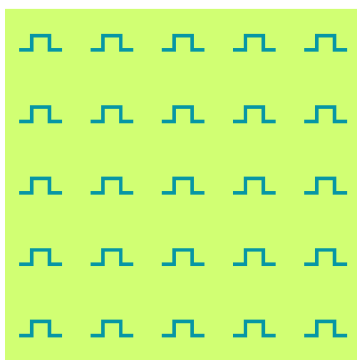
(e) 4x8x4 - 5% - Inter.



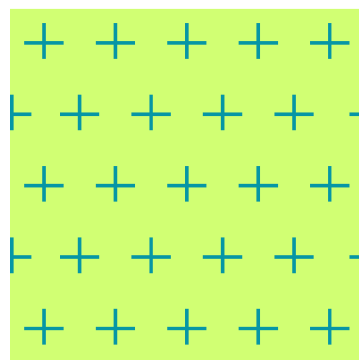
(f) 4x8x4 - 5% - Alig.



(g) Hat - 5% - Inter.

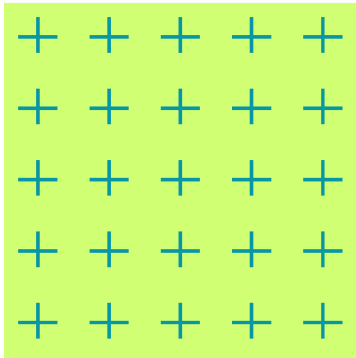


(h) Hat - 5% - Alig.

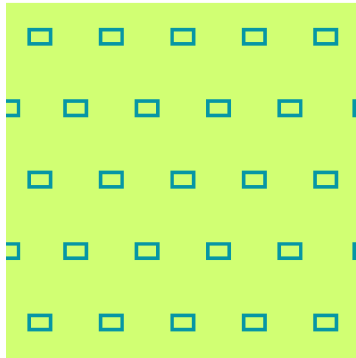


(i) Cross - 5% - Inter.

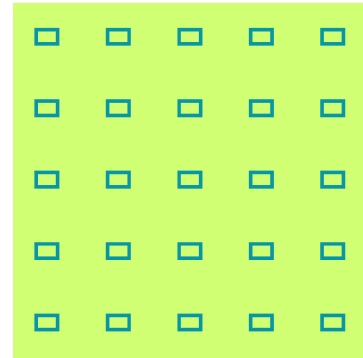
Figura A.5: Fuelbreak configurations using 5% of the total forest in Homogeneous Forest C1.



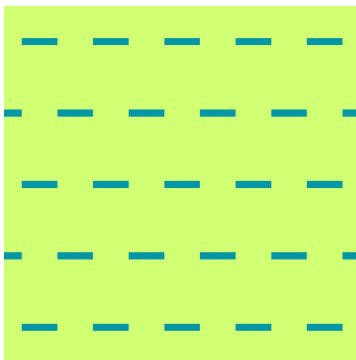
(j) Cross - 5% - Alig.



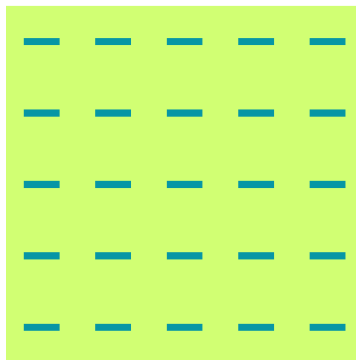
(k) 5x7x5x7 - 5% - Inter.



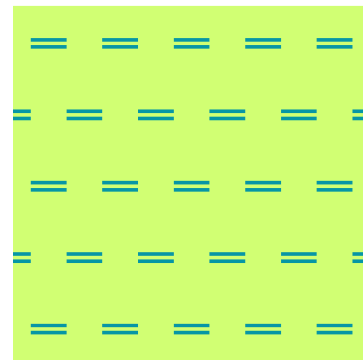
(l) 5x7x5x7 - 5% - Alig.



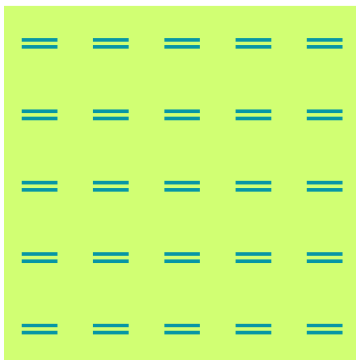
(m) 10-0-10 - 5% - Inter.



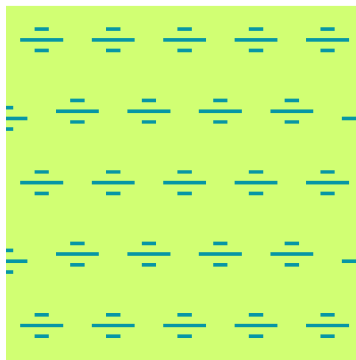
(n) 10-0-10 - 5% - Alig.



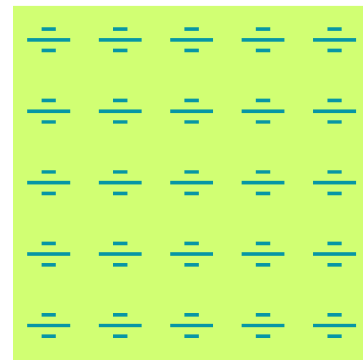
(ñ) 10-1-10 - 5% - Inter.



(o) 10-1-10 - 5% - Alig.



(p) 4-2-12-2-4 - 5% - Inter.



(q) 4-2-12-2-4 - 5% - Alig.

Anexo B

Resultados simulaciones

B.1. Heterogeneous NF

Tabla B.1: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 1%. In green, Random - 1% - Random configuration

Heterogeneous NF - 1%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Aligned	538	406.14	1339	2	479.5	1848
2	Cross	Aligned	540	390.62	1374	2	530	1848
3	Hat	Aligned	550	407.98	1384	2	528	1848
4	4-2-12-2-4	Aligned	557	410.47	1376	2	536	1848
5	10-1-10	Aligned	569	412.91	1380	2	567	1848
6	7x8x7	Aligned	572	410.10	1442	2	558.5	1848
7	10-0-10	Aligned	572	413.86	1382	2	574	1848
8	Random	Random	587	416.59	1407	2	618	1827
9	5x7x5x7	Aligned	588	415.16	1407	2	619	1848
10	4x8x4	Aligned	594	420.16	1439	2	630	1848
11	Cross	Interleaved	639	511.51	2076	2	612	1848
12	7x8x7	Interleaved	652	519.66	2079	2	620	1848
13	5x12x5	Interleaved	661	527.64	2065	2	621	1848
14	Hat	Interleaved	665	528.35	2066	2	624	1848
15	4-2-12-2-4	Interleaved	668	529.82	2066	2	632.5	1848
16	5x7x5x7	Interleaved	676	532.05	2080	2	644.5	1848
17	4x8x4	Interleaved	679	532.84	2082	2	643.5	1848
18	10-1-10	Interleaved	682	534.95	2077	2	650.5	1848
19	10-0-10	Interleaved	684	535.26	2077	2	650	1848

Tabla B.2: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 2%. In green, Random - 2% - Random configuration

Heterogeneous NF - 2%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	Cross	Aligned	613	505.71	2072	2	578.5	1848
2	Cross	Interleaved	616	457.33	1864	2	638	1848
3	5x12x5	Interleaved	619	450.64	1714	2	639	1848
4	7x8x7	Aligned	620	511.50	2076	2	563	1848
5	5x12x5	Aligned	627	516.85	2055	2	585	1848
6	Hat	Interleaved	629	459.71	1759	2	651	1848
7	4-2-12-2-4	Interleaved	634	463.87	1771	2	650	1848
8	Hat	Aligned	636	521.14	2062	2	593	1848
9	Random	Random	636	516.33	2062	2	580	1821
10	7x8x7	Interleaved	639	482.74	1926	2	642	1848
11	4-2-12-2-4	Aligned	640	524.11	2062	2	593	1848
12	5x7x5x7	Aligned	649	524.18	2080	2	587	1848
13	10-1-10	Interleaved	650	485.36	1873	2	655.5	1848
14	4x8x4	Aligned	651	527.15	2080	2	585	1848
15	10-0-10	Interleaved	652	485.94	1881	2	655	1848
16	5x7x5x7	Interleaved	653	494.51	1929	2	649	1848
17	10-1-10	Aligned	656	528.35	2075	2	593	1848
18	4x8x4	Interleaved	657	497.07	1939	2	652	1848
19	10-0-10	Aligned	660	529.04	2076	2	601	1848

Tabla B.3: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 3%. In green, Random - 3% - Random configuration

Heterogeneous NF - 3%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	Cross	Aligned	465	336.45	1300	2	450.5	1848
2	5x12x5	Aligned	471	368.24	1305	2	423	1848
3	Cross	Interleaved	473	340.28	1313	2	474.5	1848
4	5x12x5	Interleaved	478	373.52	1305	2	443	1848
5	Hat	Aligned	487	371.43	1298	2	456	1848
6	Hat	Interleaved	498	377.30	1298	2	502.5	1848
7	7x8x7	Aligned	498	367.67	1442	2	485.5	1848
8	7x8x7	Interleaved	503	370.82	1477	2	517	1848
9	4-2-12-2-4	Aligned	509	378.87	1353	2	492.5	1848
10	4-2-12-2-4	Interleaved	515	380.11	1353	2	523	1848
11	10-0-10	Aligned	529	389.65	1360	2	514	1848
12	5x7x5x7	Aligned	538	389.01	1407	2	552	1848
13	10-1-10	Aligned	539	417.38	1592	2	511.5	1848
14	10-0-10	Interleaved	539	393.86	1368	2	552.5	1848
15	Random	Random	541	391.08	1407	2	552	1758
16	4x8x4	Aligned	544	394.46	1439	2	550	1848
17	5x7x5x7	Interleaved	549	398.07	1476	2	585.5	1848
18	4x8x4	Interleaved	552	399.60	1474	2	587	1848
19	10-1-10	Interleaved	557	425.51	1636	2	573	1848

Tabla B.4: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous NF forest - 4%. In green, Random - 4% - Random configuration

Heterogeneous NF - 4%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	482	381.71	1390	2	470.5	1848
2	Cross	Interleaved	497	384.99	1540	2	517.5	1848
3	Hat	Interleaved	509	394.86	1493	2	525	1848
4	7x8x7	Interleaved	518	438.95	1853	2	475	1848
5	5x12x5	Aligned	519	418.99	1415	2	521.5	1848
6	4-2-12-2-4	Interleaved	530	400.64	1486	2	548	1848
7	7x8x7	Aligned	538	451.25	1796	2	524.5	1848
8	Cross	Aligned	539	426.28	1559	2	563	1848
9	Hat	Aligned	551	433.45	1496	2	570	1848
10	10-1-10	Interleaved	556	434.34	1660	2	557.5	1848
11	4x8x4	Interleaved	558	455.80	1779	2	539	1848
12	5x7x5x7	Interleaved	558	454.68	1788	2	542.5	1848
13	10-0-10	Interleaved	568	440.56	1678	2	567.5	1848
14	Random	Random	569	446.49	1622	2	599	1755
15	4-2-12-2-4	Aligned	576	444.26	1529	2	594.5	1848
16	4x8x4	Aligned	577	459.25	1624	2	594	1848
17	5x7x5x7	Aligned	578	459.10	1632	2	601	1848
18	10-1-10	Aligned	584	451.13	1553	2	598	1848
19	10-0-10	Aligned	595	458.76	1577	2	614	1848

Tabla B.5: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks in Heterogeneous NF forest - 5%. In green, Random - 5% - Random configuration

Heterogeneous NF - 5%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	313	310.84	1246	2	173.5	1848
2	5x12x5	Aligned	330	328.72	1246	2	174	1848
3	4-2-12-2-4	Interleaved	363	342.45	1308	2	229	1848
4	7x8x7	Interleaved	364	307.82	1256	2	303.5	1848
5	Cross	Interleaved	366	288.98	1032	2	342	1848
6	7x8x7	Aligned	379	324.72	1280	2	297	1848
7	4-2-12-2-4	Aligned	384	360.90	1308	2	230.5	1848
8	Hat	Interleaved	389	322.74	1255	2	362	1848
9	Cross	Aligned	406	324.95	1146	2	370	1848
10	5x7x5x7	Interleaved	429	340.91	1220	2	405.5	1848
11	4x8x4	Interleaved	432	344.72	1277	2	391	1848
12	10-1-10	Interleaved	433	347.88	1305	2	398.5	1848
13	Hat	Aligned	434	354.66	1255	2	399	1848
14	10-0-10	Interleaved	445	354.94	1311	2	412.5	1848
15	4x8x4	Aligned	457	361.94	1289	2	452	1848
16	5x7x5x7	Aligned	457	363.38	1235	2	462	1848
17	Random	Random	464	367.58	1235	2	477	1719
18	10-1-10	Aligned	475	375.99	1305	2	487	1848
19	10-0-10	Aligned	483	381.72	1311	2	496	1848

B.2. Heterogeneous C1

Tabla B.6: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest- 1%. In green, Random - 1% - Random configuration

Heterogeneous C1- 1%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Aligned	1023	457.99	1911	109	1106	2400
2	Hat	Aligned	1052	460.81	1928	95	1119.5	2400
3	4-2-12-2-4	Aligned	1071	454.62	1969	109	1127	2400
4	Cross	Aligned	1073	417.97	1966	109	1113.5	2400
5	7x8x7	Aligned	1074	423.98	1915	109	1146.5	2400
6	10-1-10	Aligned	1099	447.47	1973	109	1157	2400
7	10-0-10	Aligned	1106	446.04	1971	109	1160	2400
8	4x8x4	Aligned	1133	428.05	1953	109	1187.5	2400
9	Random	Random	1149	419.21	1970	109	1197	2370
10	5x7x5x7	Aligned	1151	418.18	1970	109	1199	2400
11	Cross	Interleaved	1189	471.13	2460	109	1230	2400
12	7x8x7	Interleaved	1194	467.60	2460	108	1222	2400
13	5x12x5	Interleaved	1201	461.11	2459	109	1242	2400
14	Hat	Interleaved	1215	463.05	2460	109	1256	2400
15	4-2-12-2-4	Interleaved	1221	463.86	2460	109	1267	2400
16	5x7x5x7	Interleaved	1224	466.20	2460	109	1265	2400
17	4x8x4	Interleaved	1225	466.47	2460	109	1263.5	2400
18	10-1-10	Interleaved	1229	464.56	2460	109	1274	2400
19	10-0-10	Interleaved	1233	464.90	2460	109	1279	2400

Tabla B.7: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 2%. In green, Random - 2% - Random configuration

Heterogeneous C1- 2%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	7x8x7	Aligned	1127	461.11	2446	108	1141.5	2400
2	5x12x5	Aligned	1129	455.76	2428	109	1149.5	2400
3	Cross	Interleaved	1130	447.71	2133	109	1148	2400
4	Cross	Aligned	1130	463.48	2447	109	1153	2400
5	5x12x5	Interleaved	1132	436.68	1994	109	1171.5	2400
6	Hat	Interleaved	1143	446.15	2018	109	1186.5	2400
7	Hat	Aligned	1154	460.48	2441	109	1182.5	2400
8	4-2-12-2-4	Interleaved	1154	452.71	2017	109	1196.5	2400
9	7x8x7	Interleaved	1165	449.62	2248	108	1197	2400
10	Random	Random	1165	457.77	2437	109	1201.5	2352
11	5x7x5x7	Aligned	1171	458.68	2437	109	1206	2400
12	4x8x4	Aligned	1172	465.36	2447	109	1210	2400
13	4-2-12-2-4	Aligned	1172	465.55	2446	109	1215	2400
14	10-1-10	Interleaved	1180	455.45	2153	109	1211.5	2400
15	10-1-10	Aligned	1182	462.00	2442	109	1229	2400
16	10-0-10	Interleaved	1184	454.92	2161	109	1216	2400
17	10-0-10	Aligned	1189	461.86	2443	109	1235	2400
18	4x8x4	Interleaved	1195	457.75	2255	109	1244.5	2400
19	5x7x5x7	Interleaved	1195	452.32	2237	109	1240.5	2400

Tabla B.8: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 3%. In green, Random - 3% - Random configuration

Heterogeneous C1- 3%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	881	410.80	1776	60	957.5	2400
2	5x12x5	Aligned	885	399.92	1782	60	913	2400
3	Hat	Interleaved	928	426.19	1794	72	998.5	2400
4	Cross	Interleaved	939	379.86	1791	80	974.5	2400
5	Hat	Aligned	940	417.51	1813	72	968	2400
6	7x8x7	Interleaved	952	391.56	1804	82	993	2400
7	7x8x7	Aligned	958	394.19	1849	82	978.5	2400
8	Cross	Aligned	960	382.56	1837	80	967.5	2400
9	4-2-12-2-4	Interleaved	969	421.02	1927	97	1018.5	2400
10	4-2-12-2-4	Aligned	984	417.17	1934	97	999	2400
11	10-0-10	Interleaved	1022	423.88	1931	102	1069	2400
12	10-1-10	Interleaved	1029	436.46	1945	41	1076	2400
13	10-1-10	Aligned	1036	438.16	1945	41	1048	2400
14	10-0-10	Aligned	1036	422.51	1931	102	1069	2400
15	4x8x4	Interleaved	1039	403.27	1898	100	1082	2400
16	4x8x4	Aligned	1049	402.23	1899	100	1076	2400
17	5x7x5x7	Interleaved	1059	400.04	1860	89	1105	2400
18	Random	Random	1062	402.37	1891	89	1098	2292
19	5x7x5x7	Aligned	1070	399.88	1891	89	1100	2400

Tabla B.9: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 4%. In green, Random - 4% - Random configuration

Heterogeneous C1- 4%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	823	336.19	1547	28	864.5	2400
2	Cross	Interleaved	879	355.98	1757	41	935	2400
3	Hat	Interleaved	881	355.03	1693	40	928	2400
4	5x12x5	Aligned	913	387.57	1722	28	942.5	2400
5	4-2-12-2-4	Interleaved	924	379.29	1713	42	964	2400
6	7x8x7	Interleaved	943	419.53	1982	27	985	2400
7	10-1-10	Interleaved	959	395.19	1904	41	993.5	2400
8	4x8x4	Interleaved	968	407.37	2067	56	1001	2400
9	Cross	Aligned	979	421.30	1983	41	999	2400
10	Hat	Aligned	981	402.49	1867	40	1018	2400
11	5x7x5x7	Interleaved	984	407.46	2071	43	1021	2400
12	10-0-10	Interleaved	986	403.94	1925	45	1028	2400
13	7x8x7	Aligned	999	460.43	2163	27	969	2400
14	4-2-12-2-4	Aligned	1026	423.42	1925	42	1080.5	2400
15	Random	Random	1029	429.75	2084	43	1063	2301
16	4x8x4	Aligned	1040	433.59	2025	56	1064.5	2400
17	10-1-10	Aligned	1043	427.70	1980	41	1080	2400
18	5x7x5x7	Aligned	1048	433.99	2084	43	1076	2400
19	10-0-10	Aligned	1068	436.33	1997	45	1108	2400

Tabla B.10: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous C1 forest - 5%. In green, Random - 5% - Random configuration

Heterogeneous C1 - 5%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	619	307.00	1470	3	651	2400
2	5x12x5	Aligned	698	329.50	1470	3	736	2400
3	Hat	Interleaved	713	336.25	1699	28	779	2400
4	7x8x7	Interleaved	733	293.46	1478	27	765.5	2400
5	Cross	Interleaved	734	315.12	1405	29	784	2400
6	4-2-12-2-4	Interleaved	786	371.80	1685	33	841	2400
7	Hat	Aligned	796	361.44	1698	28	844.5	2400
8	7x8x7	Aligned	800	331.25	1633	27	847	2400
9	10-1-10	Interleaved	812	365.36	1775	36	871	2400
10	Cross	Aligned	828	357.71	1673	29	857	2400
11	4x8x4	Interleaved	867	344.57	1706	40	908.5	2400
12	10-0-10	Interleaved	867	366.83	1775	34	920	2400
13	4-2-12-2-4	Aligned	878	389.22	1685	33	888.5	2400
14	10-1-10	Aligned	888	398.37	1775	36	923	2400
15	5x7x5x7	Interleaved	891	347.24	1646	25	947.5	2400
16	4x8x4	Aligned	926	377.65	1780	40	965	2400
17	Random	Random	938	388.16	1772	25	991	2235
18	10-0-10	Aligned	940	397.24	1775	34	964	2400
19	5x7x5x7	Aligned	948	382.40	1772	25	996.5	2400

B.3. Heterogeneous O1b

Tabla B.11: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 1%. In green, Random - 1% - Random configuration

Heterogeneous O1b - 1%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Aligned	700	400.95	1500	51	667	2400
2	Hat	Aligned	717	405.89	1551	39	704	2400
3	Cross	Aligned	717	389.23	1565	40	723	2400
4	4-2-12-2-4	Aligned	725	408.54	1525	34	709.5	2400
5	7x8x7	Aligned	746	392.62	1614	28	741	2400
6	10-1-10	Aligned	748	412.36	1653	28	738.5	2400
7	10-0-10	Aligned	753	412.09	1657	36	744	2400
8	4x8x4	Aligned	780	413.84	1801	24	772	2400
9	Random	Random	781	402.97	1784	37	772	2370
10	5x7x5x7	Aligned	784	402.60	1784	37	775	2400
11	Cross	Interleaved	858	468.91	2407	104	795	2400
12	7x8x7	Interleaved	868	471.28	2407	97	808	2400
13	5x12x5	Interleaved	879	476.43	2406	106	824	2400
14	Hat	Interleaved	883	477.15	2407	106	831.5	2400
15	4-2-12-2-4	Interleaved	888	477.97	2407	106	835.5	2400
16	5x7x5x7	Interleaved	889	478.12	2407	106	848	2400
17	4x8x4	Interleaved	891	479.57	2407	106	855	2400
18	10-1-10	Interleaved	896	480.74	2407	106	860.5	2400
19	10-0-10	Interleaved	897	481.04	2407	106	861.5	2400

Tabla B.12: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 2%. In green, Random - 2% - Random configuration

Heterogeneous O1b - 2%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	Cross	Interleaved	777	420.82	2103	104	706	2400
2	5x12x5	Interleaved	786	415.54	1884	106	742	2400
3	Hat	Interleaved	794	423.30	1931	106	742.5	2400
4	Cross	Aligned	799	461.52	2394	104	757	2400
5	7x8x7	Aligned	807	458.16	2389	97	769	2400
6	4-2-12-2-4	Interleaved	807	427.21	1942	106	758	2400
7	5x12x5	Aligned	812	460.97	2375	106	785	2400
8	7x8x7	Interleaved	814	434.37	2203	97	757.5	2400
9	Hat	Aligned	823	464.51	2388	106	791.5	2400
10	10-1-10	Interleaved	827	443.68	2119	106	763	2400
11	10-0-10	Interleaved	832	441.21	2127	106	776	2400
12	Random	Random	835	461.34	2384	106	819	2352
13	5x7x5x7	Interleaved	837	442.69	2199	106	792	2400
14	4x8x4	Interleaved	839	446.59	2214	106	784.5	2400
15	5x7x5x7	Aligned	841	467.37	2384	106	819.5	2400
16	4-2-12-2-4	Aligned	842	471.99	2393	106	812	2400
17	4x8x4	Aligned	844	471.13	2394	106	819.5	2400
18	10-1-10	Aligned	854	471.61	2389	106	831	2400
19	10-0-10	Aligned	858	472.47	2390	106	835.5	2400

Tabla B.13: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 3%. In green, Random - 3% - Random configuration

Heterogeneous O1b - 3%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	590	347.25	1379	51	543	2400
2	5x12x5	Aligned	590	344.50	1379	51	543	2400
3	Cross	Interleaved	608	332.99	1461	40	588	2400
4	Cross	Aligned	613	337.87	1565	40	600.5	2400
5	Hat	Interleaved	620	359.36	1393	39	586	2400
6	Hat	Aligned	623	361.17	1412	39	586	2400
7	7x8x7	Aligned	644	340.50	1614	28	614	2400
8	7x8x7	Interleaved	647	343.57	1627	28	614	2400
9	4-2-12-2-4	Interleaved	650	362.95	1441	34	631.5	2400
10	4-2-12-2-4	Aligned	653	366.00	1441	34	624.5	2400
11	10-1-10	Aligned	691	396.77	1717	30	712	2400
12	10-1-10	Interleaved	695	393.12	1684	30	721	2400
13	10-0-10	Interleaved	695	379.89	1642	36	683	2400
14	10-0-10	Aligned	697	380.99	1657	36	676	2400
15	4x8x4	Interleaved	703	382.26	1765	24	675	2400
16	4x8x4	Aligned	703	381.70	1801	24	675.5	2400
17	Random	Random	711	378.80	1784	37	688	2292
18	5x7x5x7	Interleaved	712	374.05	1753	37	694.5	2400
19	5x7x5x7	Aligned	713	374.97	1784	37	692	2400

Tabla B.14: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 4%. In green, Random - 4% - Random configuration

Heterogeneous O1b - 4%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	575	330.27	1530	28	509.5	2400
2	Cross	Interleaved	608	348.04	1725	41	550.5	2400
3	Hat	Interleaved	623	343.00	1643	40	569	2400
4	5x12x5	Aligned	642	380.06	1675	28	576.5	2400
5	4-2-12-2-4	Interleaved	655	354.20	1628	42	626	2400
6	7x8x7	Interleaved	663	386.94	1964	27	628	2400
7	Cross	Aligned	678	398.62	1833	41	632.5	2400
8	4x8x4	Interleaved	678	397.44	2030	56	600	2400
9	10-1-10	Interleaved	682	383.03	1872	41	646	2400
10	5x7x5x7	Interleaved	695	397.51	2039	43	654	2400
11	7x8x7	Aligned	698	419.90	2059	27	668	2400
12	Hat	Aligned	701	389.57	1779	40	661	2400
13	10-0-10	Interleaved	706	388.48	1892	45	684	2400
14	4x8x4	Aligned	723	412.49	1921	56	669	2400
15	Random	Random	725	403.07	1934	43	709	2301
16	4-2-12-2-4	Aligned	731	397.88	1803	42	729.5	2400
17	5x7x5x7	Aligned	736	413.59	1934	43	711.5	2400
18	10-1-10	Aligned	743	405.63	1834	41	739	2400
19	10-0-10	Aligned	763	411.63	1861	45	772.5	2400

Tabla B.15: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Heterogeneous O1b forest - 5%. In green, Random - 5% - Random configuration

Heterogeneous O1b - 5%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	398	281.86	1305	3	359	2400
2	5x12x5	Aligned	432	314.54	1305	3	373	2400
3	Cross	Interleaved	467	284.93	1160	29	439.5	2400
4	7x8x7	Interleaved	467	280.91	1288	27	439.5	2400
5	Hat	Interleaved	483	298.86	1322	28	472	2400
6	7x8x7	Aligned	501	315.68	1484	27	453	2400
7	4-2-12-2-4	Interleaved	503	314.74	1397	33	481.5	2400
8	Cross	Aligned	519	341.16	1465	29	454.5	2400
9	Hat	Aligned	531	343.54	1358	28	482	2400
10	4-2-12-2-4	Aligned	546	349.84	1397	33	506	2400
11	10-1-10	Interleaved	551	330.23	1412	28	580	2400
12	4x8x4	Interleaved	554	327.06	1538	25	507	2400
13	10-0-10	Interleaved	579	341.87	1432	34	605	2400
14	5x7x5x7	Interleaved	582	328.07	1534	25	553	2400
15	4x8x4	Aligned	587	359.78	1703	25	512.5	2400
16	10-1-10	Aligned	598	374.22	1630	28	578	2400
17	Random	Random	614	370.28	1678	25	551	2235
18	5x7x5x7	Aligned	616	364.93	1678	25	553	2400
19	10-0-10	Aligned	623	381.35	1639	34	611	2400

B.4. Homogeneous C1

Tabla B.16: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 1%. In green, Random - 1% - Random configuration

Homogeneous C1 - 1%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Aligned	1168	366.35	2097	92	1209	2400
2	Hat	Aligned	1221	350.50	2144	253	1225	2400
3	Cross	Aligned	1221	312.24	2290	496	1197	2400
4	7x8x7	Aligned	1230	297.56	2125	216	1216	2400
5	4-2-12-2-4	Aligned	1246	357.31	2235	352	1242	2400
6	10-1-10	Aligned	1278	321.60	2227	448	1245.5	2400
7	10-0-10	Aligned	1294	322.29	2286	548	1252	2400
8	4x8x4	Aligned	1297	292.51	2246	608	1250	2400
9	5x7x5x7	Aligned	1310	286.59	2289	723	1264.5	2400
10	Random	Random	1310	286.10	2289	723	1264.5	2370
11	5x12x5	Interleaved	1360	283.59	2089	815	1344	2400
12	7x8x7	Interleaved	1360	282.75	2089	795	1337.5	2400
13	Cross	Interleaved	1364	306.71	2179	768	1325.5	2400
14	Hat	Interleaved	1391	297.58	2142	815	1371	2400
15	5x7x5x7	Interleaved	1399	296.89	2192	815	1372.5	2400
16	4x8x4	Interleaved	1401	296.05	2150	815	1378	2400
17	10-1-10	Interleaved	1406	298.46	2164	815	1391	2400
18	4-2-12-2-4	Interleaved	1412	299.39	2146	815	1392	2400
19	10-0-10	Interleaved	1416	302.15	2199	815	1394	2400

Tabla B.17: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 2%. In green, Random - 2% - Random configuration

Homogeneous C1 - 2%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Aligned	1238	281.91	2089	664	1210	2400
2	7x8x7	Aligned	1259	265.08	2089	720	1235	2400
3	Cross	Aligned	1267	268.57	2089	737	1243	2400
4	Hat	Aligned	1292	273.73	2089	704	1268	2400
5	Cross	Interleaved	1292	373.72	2590	604	1203	2400
6	4-2-12-2-4	Aligned	1325	274.78	2111	738	1308	2400
7	4x8x4	Aligned	1326	273.75	2097	730	1313	2400
8	5x12x5	Interleaved	1327	379.56	2552	516	1257	2400
9	Random	Random	1331	274.35	2089	727	1316	2352
10	5x7x5x7	Aligned	1332	273.63	2089	727	1316	2400
11	10-1-10	Aligned	1333	275.98	2111	728	1320	2400
12	Hat	Interleaved	1337	382.57	2582	513	1272.5	2400
13	10-0-10	Aligned	1352	278.10	2111	740	1341	2400
14	4-2-12-2-4	Interleaved	1356	388.37	2588	503	1292	2400
15	7x8x7	Interleaved	1358	353.05	2547	621	1305.5	2400
16	10-1-10	Interleaved	1376	371.48	2591	592	1306.5	2400
17	10-0-10	Interleaved	1379	370.95	2593	597	1307.5	2400
18	4x8x4	Interleaved	1393	357.57	2588	625	1337.5	2400
19	5x7x5x7	Interleaved	1393	352.44	2589	676	1351	2400

Tabla B.18: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 3%. In green, Random - 3% - Random configuration

Homogeneous C1 - 3%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	991	311.19	1896	92	975.5	2400
2	5x12x5	Aligned	1009	311.04	1896	92	1005	2400
3	Cross	Interleaved	1047	225.43	1841	429	1025.5	2400
4	7x8x7	Interleaved	1068	255.42	1968	216	1040	2400
5	Hat	Interleaved	1071	294.72	1912	254	1054	2400
6	Cross	Aligned	1092	247.52	1990	496	1070.5	2400
7	7x8x7	Aligned	1095	270.58	1968	216	1061	2400
8	Hat	Aligned	1101	294.90	1955	253	1089	2400
9	4-2-12-2-4	Interleaved	1115	307.63	2055	337	1118	2400
10	4-2-12-2-4	Aligned	1148	312.69	2055	352	1146.5	2400
11	10-1-10	Interleaved	1164	313.21	2091	438	1134	2400
12	4x8x4	Interleaved	1171	246.63	2017	563	1151	2400
13	5x7x5x7	Interleaved	1178	243.85	2021	676	1140	2400
14	10-1-10	Aligned	1179	302.55	2091	438	1151	2400
15	10-0-10	Interleaved	1183	280.91	2091	570	1154	2400
16	4x8x4	Aligned	1201	255.68	2017	608	1169	2400
17	Random	Random	1210	256.66	2127	723	1172	2292
18	5x7x5x7	Aligned	1216	259.70	2135	723	1178	2400
19	10-0-10	Aligned	1219	295.08	2161	548	1182	2400

Tabla B.19: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 4%. In green, Random - 4% - Random configuration

Homogeneous C1 - 4%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	862	253.15	1718	369	819.5	2400
2	Hat	Interleaved	953	233.69	1714	444	903	2400
3	Cross	Interleaved	971	178.03	1486	568	968	2400
4	7x8x7	Interleaved	995	277.49	1922	438	940.5	2400
5	4-2-12-2-4	Interleaved	1016	263.63	1879	437	961	2400
6	5x12x5	Aligned	1019	281.55	1738	496	969	2400
7	10-1-10	Interleaved	1054	255.93	1883	556	1022	2400
8	4x8x4	Interleaved	1072	256.15	1832	603	1030	2400
9	7x8x7	Aligned	1087	295.86	1922	556	1029	2400
10	5x7x5x7	Interleaved	1092	253.84	1857	601	1059	2400
11	10-0-10	Interleaved	1095	252.50	1870	574	1075	2400
12	Cross	Aligned	1117	251.61	1890	606	1092	2400
13	Hat	Aligned	1119	259.76	1835	563	1082	2400
14	4-2-12-2-4	Aligned	1182	272.03	1878	624	1161	2400
15	Random	Random	1185	258.59	1831	658	1159	2301
16	4x8x4	Aligned	1190	266.25	1962	656	1164	2400
17	5x7x5x7	Aligned	1191	260.61	1934	658	1167.5	2400
18	10-1-10	Aligned	1192	267.14	1906	635	1168	2400
19	10-0-10	Aligned	1227	267.95	1918	671	1208	2400

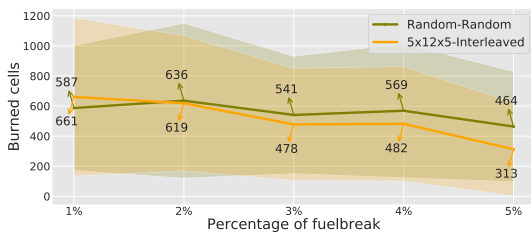
Tabla B.20: Results of the number of burned cells after the simulations for the fuelbreaks at Homogeneous C1 forest - 5%. In green, Random - 5% - Random configuration

Homogeneous C1 - 5%								
rank	fuelbreak	layout	mean	sd	max	min	median	n_obs
1	5x12x5	Interleaved	673	271.81	1637	76	629	2400
2	Hat	Interleaved	785	283.03	1677	228	753	2400
3	5x12x5	Aligned	806	248.44	1654	76	772	2400
4	7x8x7	Interleaved	807	209.51	1551	195	778.5	2400
5	Cross	Interleaved	814	207.29	1426	332	831	2400
6	4-2-12-2-4	Interleaved	867	330.07	1842	293	846.5	2400
7	10-1-10	Interleaved	913	283.79	1849	405	858	2400
8	7x8x7	Aligned	930	219.17	1569	193	927	2400
9	Hat	Aligned	952	263.48	1697	254	927	2400
10	4x8x4	Interleaved	963	237.69	1695	495	918	2400
11	10-0-10	Interleaved	965	280.94	1848	487	937	2400
12	Cross	Aligned	976	249.72	1784	471	942.5	2400
13	5x7x5x7	Interleaved	998	216.40	1665	509	970	2400
14	4-2-12-2-4	Aligned	1037	307.79	1862	363	998.5	2400
15	10-1-10	Aligned	1070	278.92	1864	426	1027.5	2400
16	4x8x4	Aligned	1082	248.08	1718	519	1051.5	2400
17	Random	Random	1109	249.27	1802	599	1070	2235
18	5x7x5x7	Aligned	1110	250.22	1885	599	1070.5	2400
19	10-0-10	Aligned	1113	287.42	1854	520	1063	2400

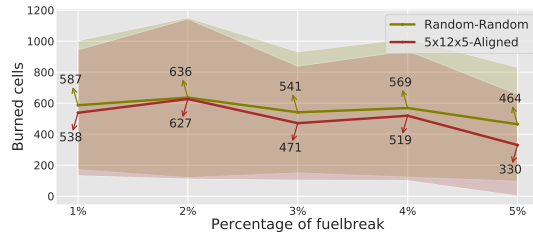
Anexo C

Gráfico promedio de celdas quemadas vs porcentaje de cortafuego

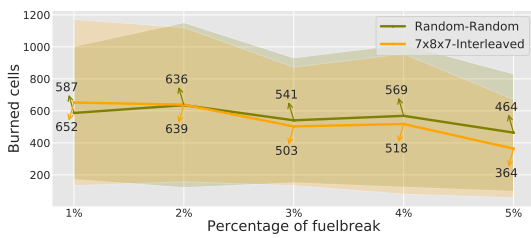
Figura C.1: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous NF forest



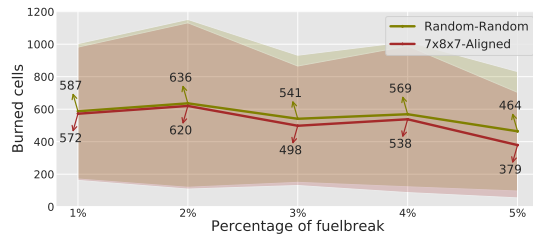
(a) 5x12x5 - Interleaved



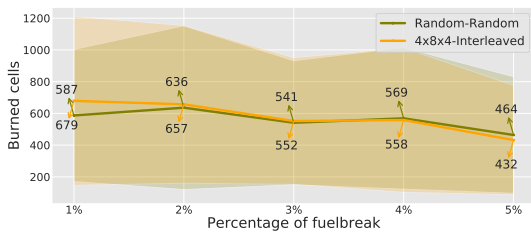
(b) 5x12x5 - Aligned



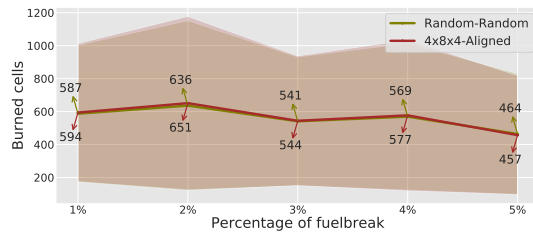
(c) 7x8x7 - Interleaved



(d) 7x8x7 - Aligned

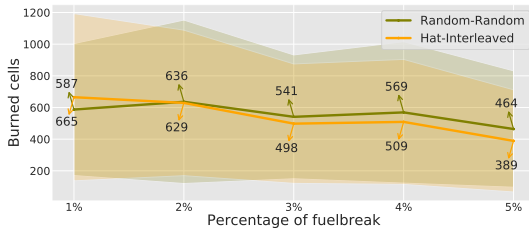


(e) 4x8x4 - Interleaved

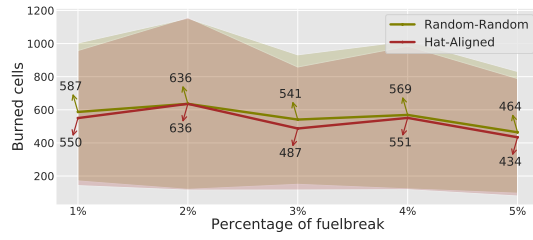


(f) 4x8x4 - Aligned

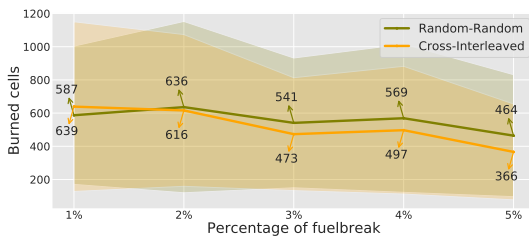
Figura C.1: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous NF forest



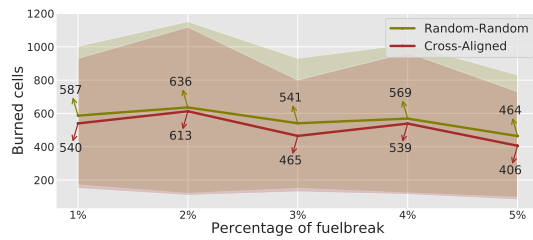
(g) Hat - Interleaved



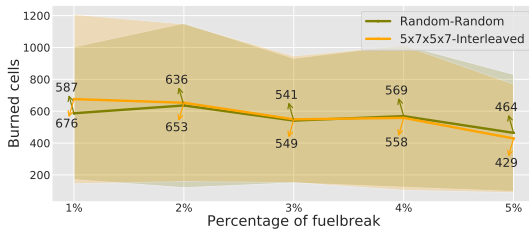
(h) Hat - Aligned



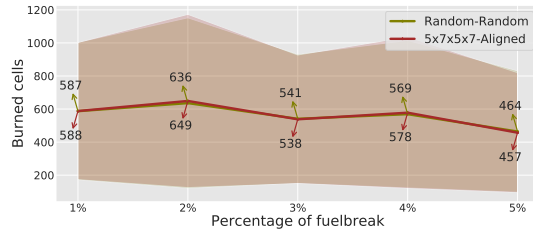
(i) Cross - Interleaved



(j) Cross - Aligned

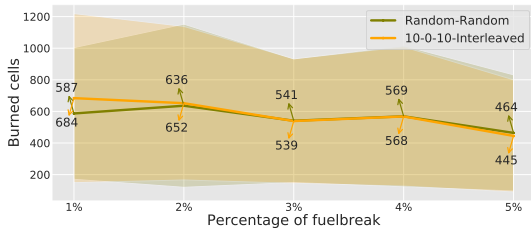


(k) 5x7x5x7 - Interleaved

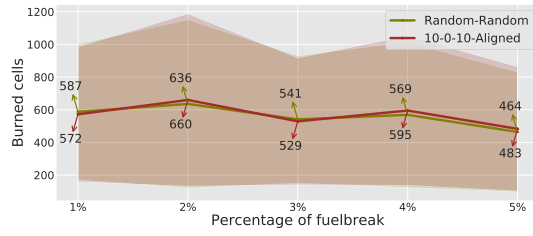


(l) 5x7x5x7 - Aligned

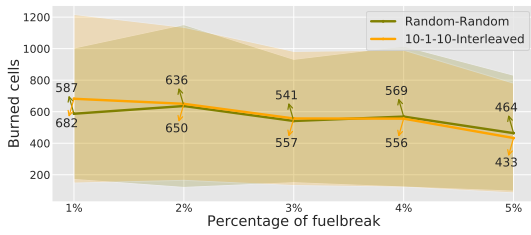
Figura C.1: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the Heterogeneous NF forest



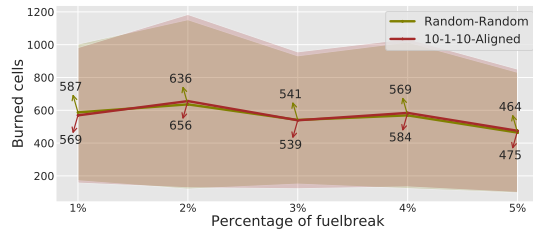
(m) 10-0-10 - Interleaved



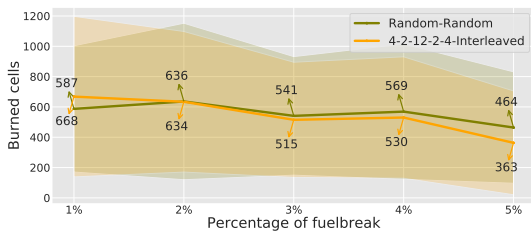
(n) 10-0-10 - Aligned



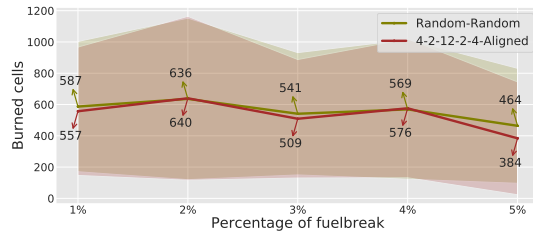
(ñ) 10-1-10 - Interleaved



(o) 10-1-10 - Aligned

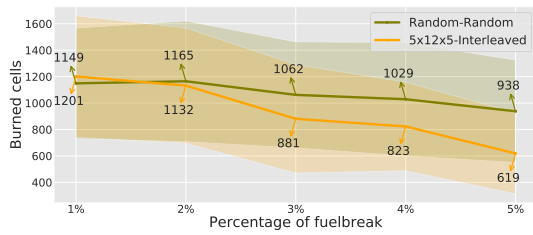


(p) 4-2-12-2-4 - Interleaved

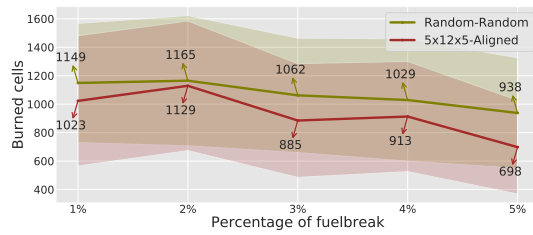


(q) 4-2-12-2-4 - Aligned

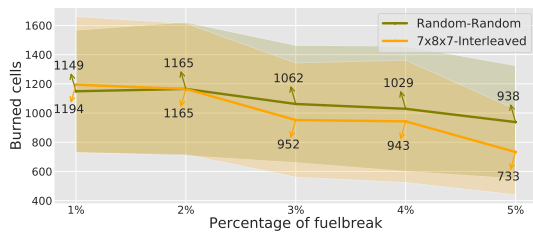
Figura C.2: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Heterogeneous C1** forest



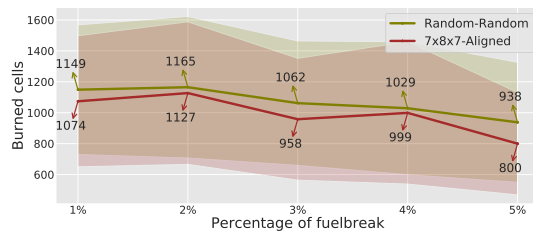
(a) 5x12x5 - Interleaved



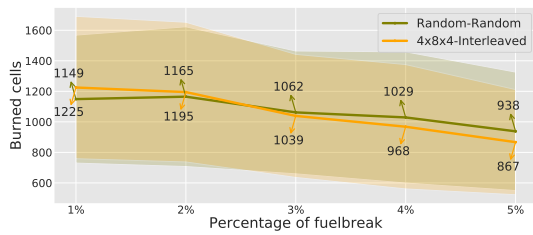
(b) 5x12x5 - Aligned



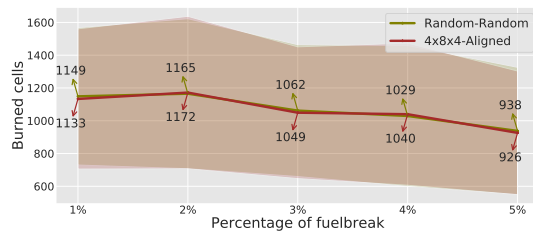
(c) 7x8x7 - Interleaved



(d) 7x8x7 - Aligned

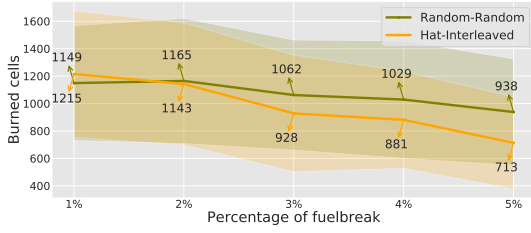


(e) 4x8x4 - Interleaved

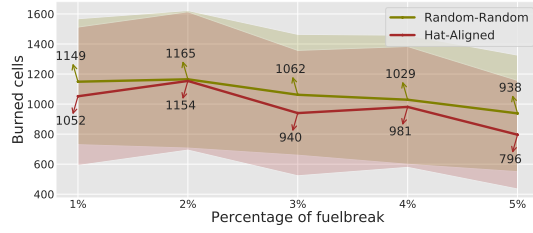


(f) 4x8x4 - Aligned

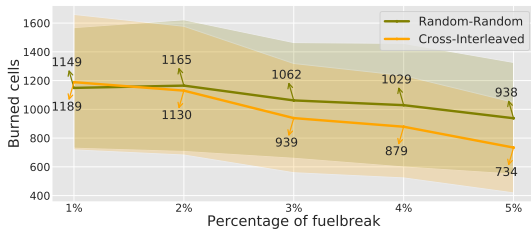
Figura C.2: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Heterogeneous C1** forest



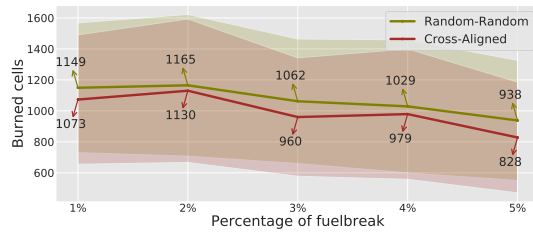
(g) Hat - Interleaved



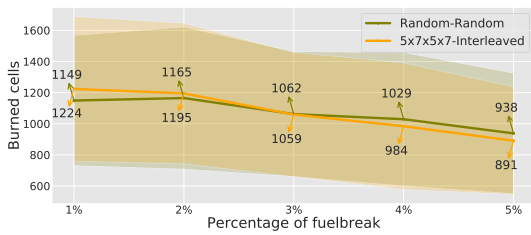
(h) Hat - Aligned



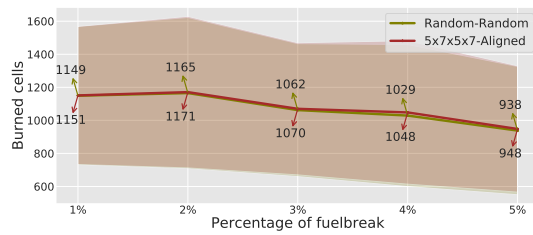
(i) Cross - Interleaved



(j) Cross - Aligned

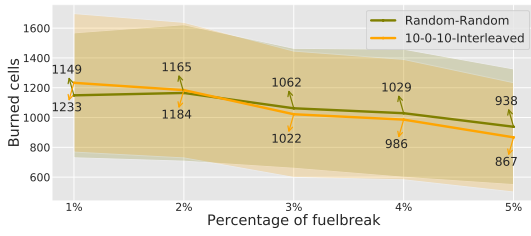


(k) 5x7x5x7 - Interleaved

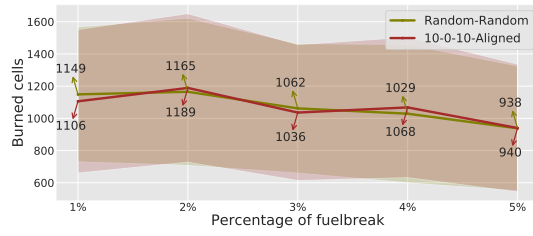


(l) 5x7x5x7 - Aligned

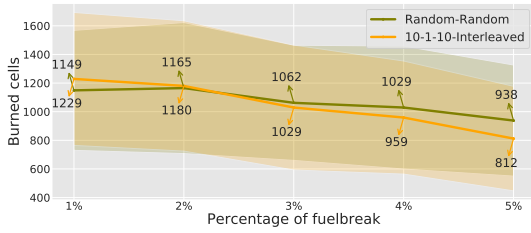
Figura C.2: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Heterogeneous C1** forest



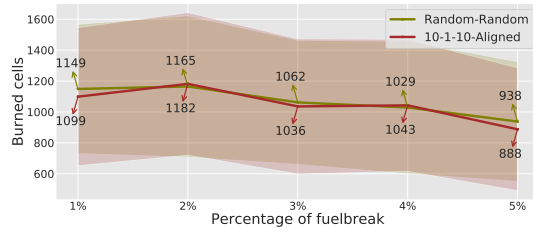
(m) 10-0-10 - Interleaved



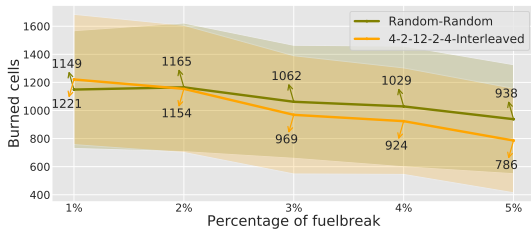
(n) 10-0-10 - Aligned



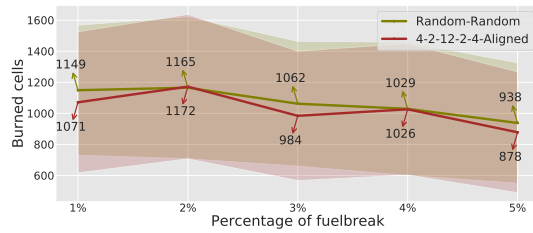
(ñ) 10-1-10 - Interleaved



(o) 10-1-10 - Aligned

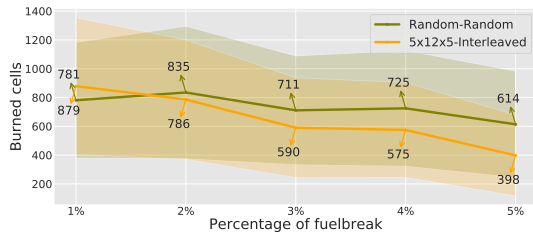


(p) 4-2-12-2-4 - Interleaved

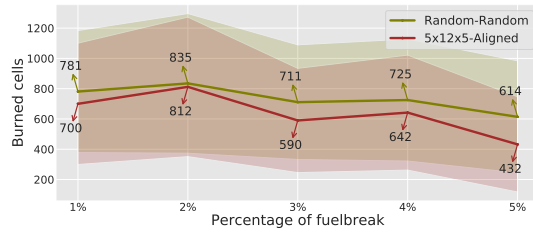


(q) 4-2-12-2-4 - Aligned

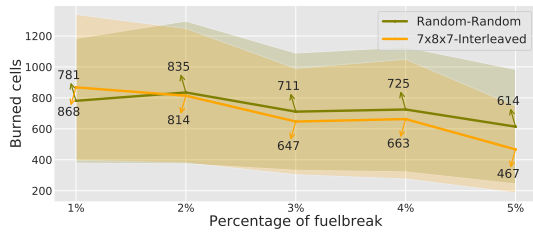
Figura C.3: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Heterogeneous O1b** forest



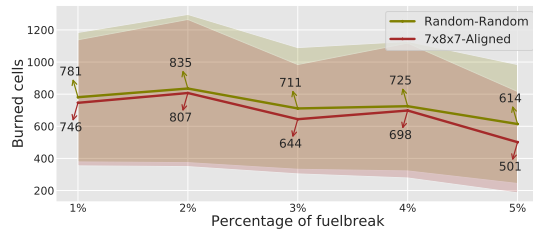
(a) 5x12x5 - Interleaved



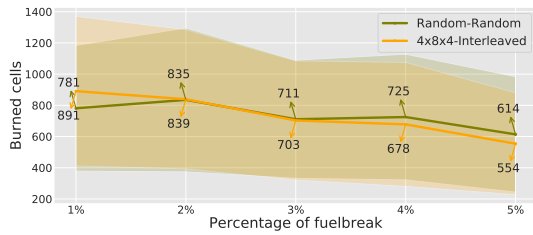
(b) 5x12x5 - Aligned



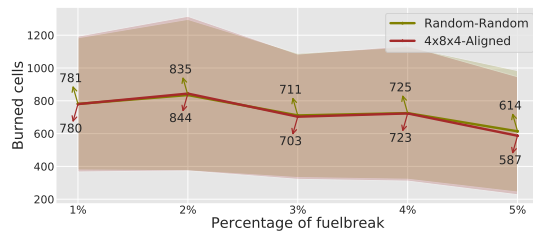
(c) 7x8x7 - Interleaved



(d) 7x8x7 - Aligned

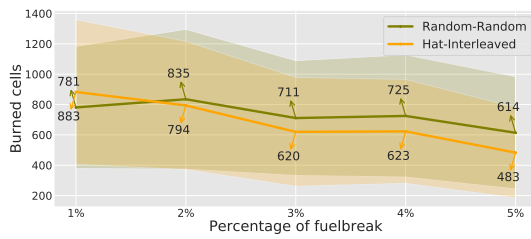


(e) 4x8x4 - Interleaved

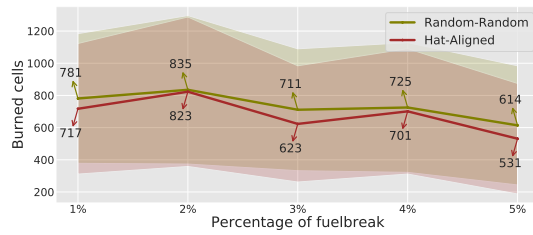


(f) 4x8x4 - Aligned

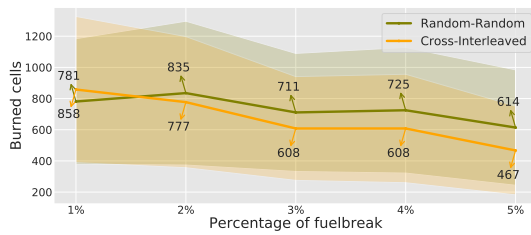
Figura C.3: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Heterogeneous O1b** forest



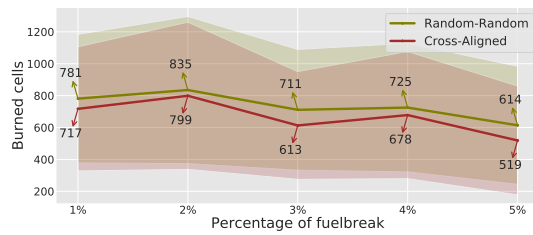
(g) Hat - Interleaved



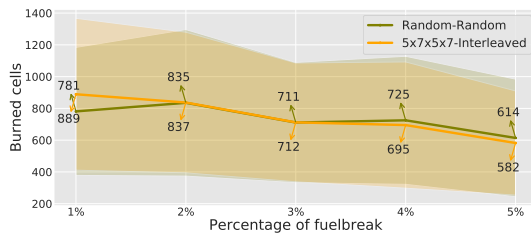
(h) Hat - Aligned



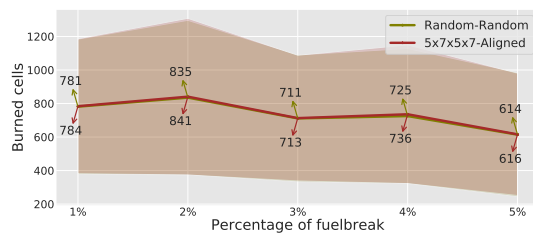
(i) Cross - Interleaved



(j) Cross - Aligned

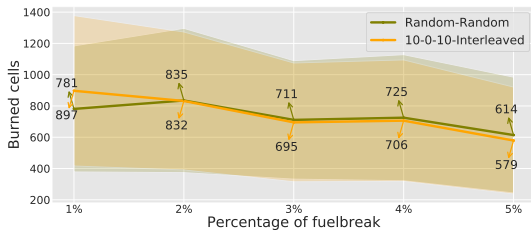


(k) 5x7x5x7 - Interleaved

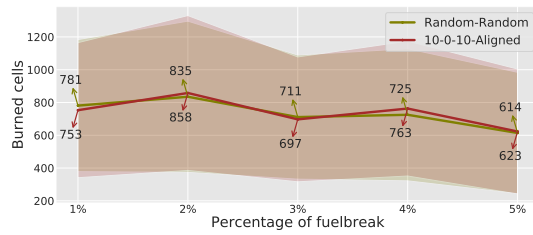


(l) 5x7x5x7 - Aligned

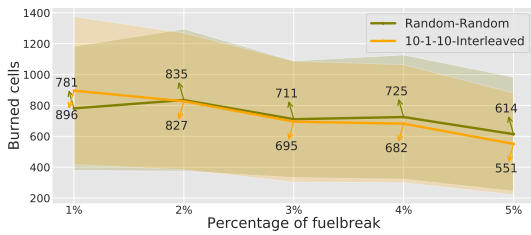
Figura C.3: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Heterogeneous O1b** forest



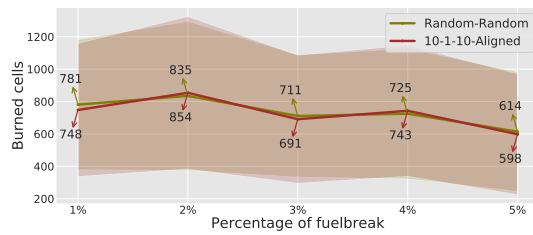
(m) 10-0-10 - Interleaved



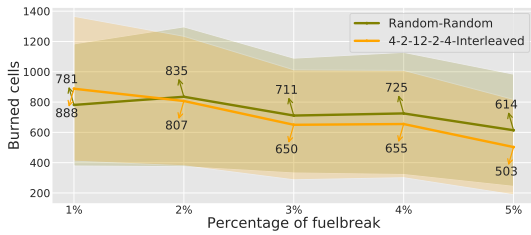
(n) 10-0-10 - Aligned



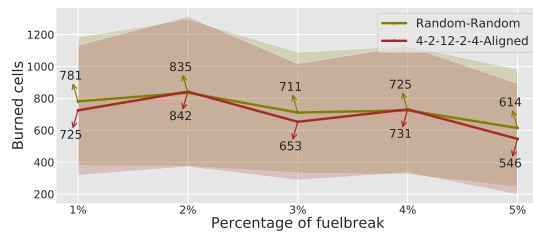
(ñ) 10-1-10 - Interleaved



(o) 10-1-10 - Aligned

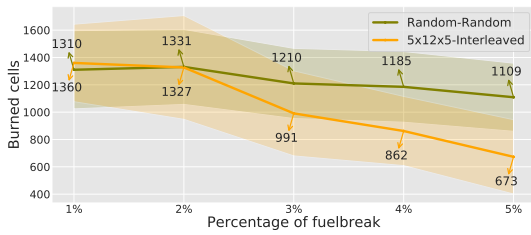


(p) 4-2-12-2-4 - Interleaved

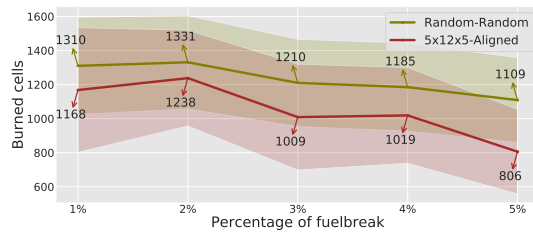


(q) 4-2-12-2-4 - Aligned

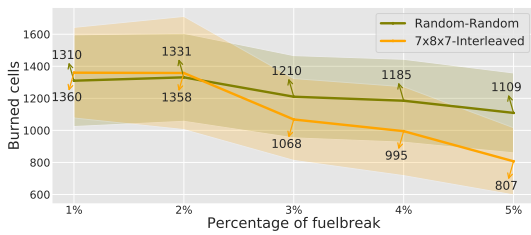
Figura C.4: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Homogeneous C1** forest



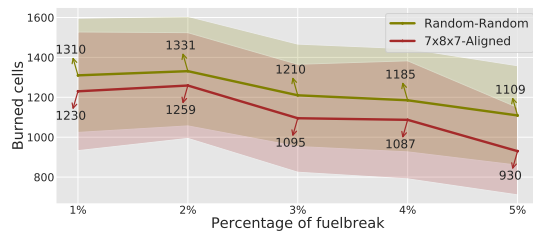
(a) 5x12x5 - Interleaved



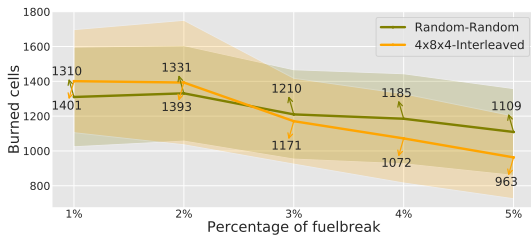
(b) 5x12x5 - Aligned



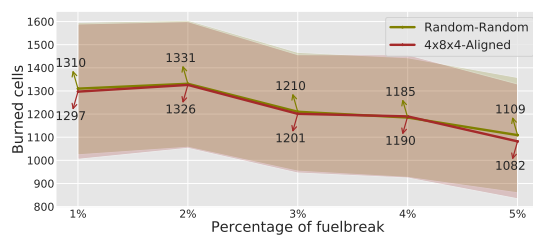
(c) 7x8x7 - Interleaved



(d) 7x8x7 - Aligned

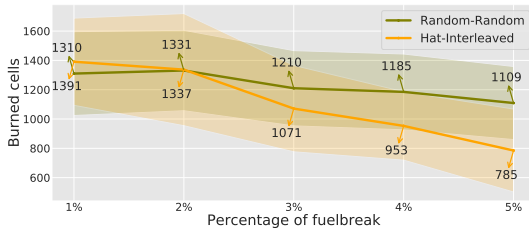


(e) 4x8x4 - Interleaved

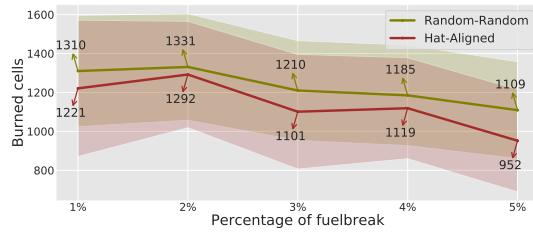


(f) 4x8x4 - Aligned

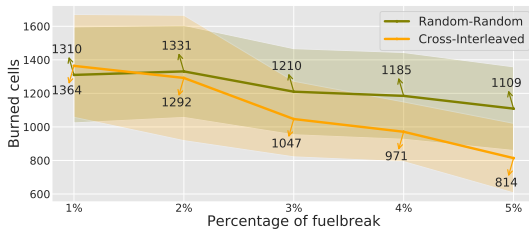
Figura C.4: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Homogeneous C1** forest



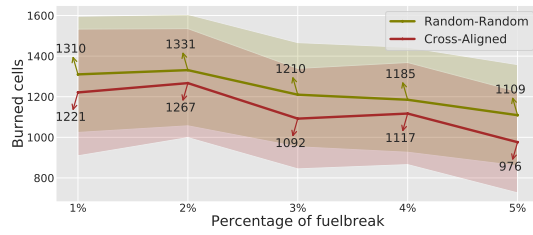
(g) Hat - Interleaved



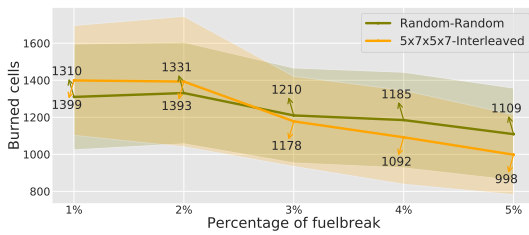
(h) Hat - Aligned



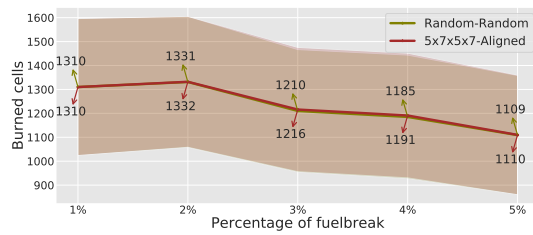
(i) Cross - Interleaved



(j) Cross - Aligned

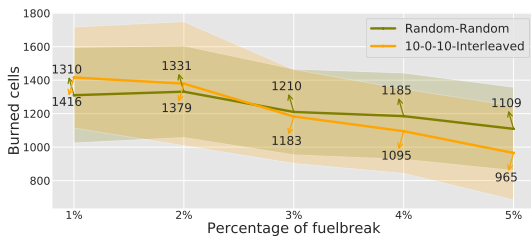


(k) 5x7x5x7 - Interleaved

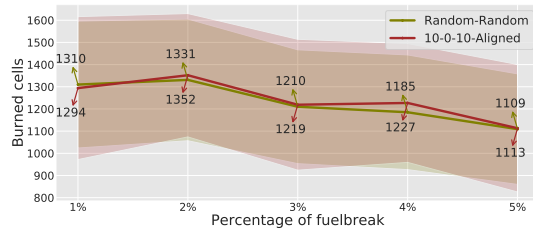


(l) 5x7x5x7 - Aligned

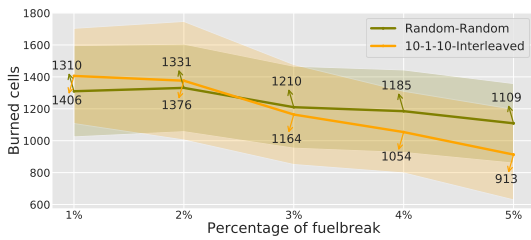
Figura C.4: Mean number of burned cells ($\mu \pm \sigma$ interval) per percentage each fuelbreak in the **Homogeneous C1** forest



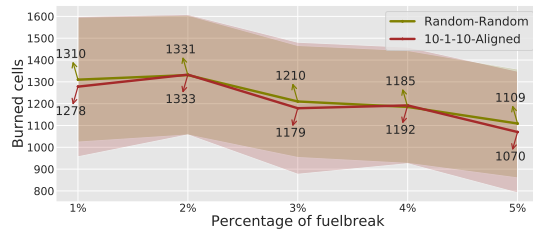
(m) 10-0-10 - Interleaved



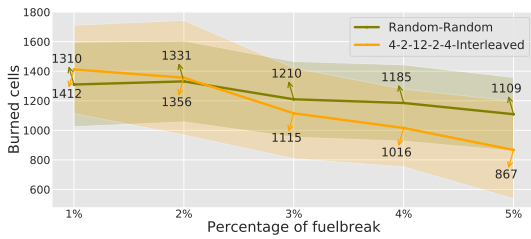
(n) 10-0-10 - Aligned



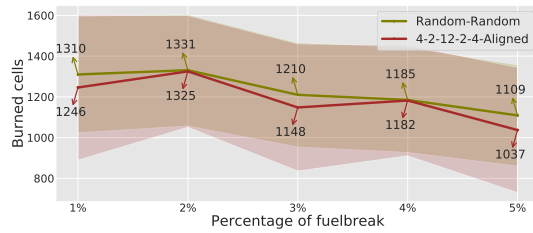
(ñ) 10-1-10 - Interleaved



(o) 10-1-10 - Aligned



(p) 4-2-12-2-4 - Interleaved



(q) 4-2-12-2-4 - Aligned