

Planificación de imágenes satelitales aplicada a modelos hidrológicos de alerta
temprana

Por Lic. Estefanía Aylén De Elia

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

MAGÍSTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA
TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Septiembre, 2011

©IG - CONAE/UNC 2011

©FaMAF - UNC 2011

Dr. Marcelo Oglietti

Palabras Claves: hidrología, modelos, inundación, planificación, imágenes satelitales, inteligencia artificial

Resumen

La tecnología espacial tiene un gran potencial lo que implica un creciente papel, en la evaluación de daños causados por situaciones de emergencias. Frente a una emergencia el tiempo es determinante y es indispensable actuar con rapidez. En el caso de las inundaciones es factible pronosticar un evento, permitiéndonos configurar futuras adquisiciones de imágenes satelitales con anticipación. El plan propuesto en este trabajo, responde a la necesidad de tener un pronosticador (modelo hidrológico) y un sistema inteligente de toma de decisiones que juntos nos permitan planificar adquisiciones de imágenes satelitales en el menor tiempo posible. Se implementó un modelo de onda cinemática de complejidad reducida para pronosticar posibles eventos de inundación y optimizar el tiempo de respuesta y se abordó el problema de planificación usando técnicas de Inteligencia Artificial.

Abstract

Meanwhile, Space technology has a great potential related with the assessment of damages caused by emergency situations. Within the emergency context time plays a significant role. In the particular case of flooding, it is rather possible to predict an event, allowing us to set up in advance future acquisitions of satellite images. Taking the former into account, this proposal was built in order to forecast affected areas by a hydrological model application and the implementation of an intelligent system to select the best acquisitions that would allow us to plan the acquisition process in the shortest time. This work implements a Reduced Complexity Kinematic Wave Model to predict potential flood events and optimize time responses. On the other hand the imagery planning problem was addressed using Artificial Intelligence techniques.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer profundamente a mi familia por su apoyo incondicional en este y cada uno de los proyectos que he emprendido a lo largo de mi vida.

Agradezco además a mis directores de tesis Dr. Marcelo Oglietti y Dr. Sergio Masuelli por los conocimientos aportados, el tiempo dedicado y la coordinación académica que me han ofrecido durante el desarrollo de mi tesis. Expreso mi gratitud a CONAE y a la Agencia Espacial Italiana (ASI) por la beca otorgada.

Agradezco al Dr. Amedeo Cesta y a todos los miembros del equipo de *Planning & Scheduling* del Instituto de Ciencias Cognitivas y Tecnología (ISTC) por su hospitalidad y apoyo durante mi estadía en Roma, donde desarrollé la base de este trabajo.

Por último me gustaría agradecer a todos los docentes de la maestría, en especial al Dr. Marcelo Scavuzzo y Agrim. Gabriel Platzeck por su acompañamiento profesional en el desarrollo de mi formación. A mis compañeros de maestría, por el agradable ambiente de trabajo que entre todos logramos mantener, por nuestros interminables debates y por la ayuda que me brindaron a lo largo de estos dos años.

Resumen

La observación de la Tierra desde el espacio ha experimentado en los últimos años un rápido desarrollo, convirtiéndose indispensable en el monitoreo de procesos naturales de gran impacto para nuestro planeta. La tecnología espacial tiene un gran potencial lo que implica un creciente papel, entre otras cosas, en la evaluación de daños causados por situaciones de emergencias. Frente a una emergencia el tiempo es determinante, es indispensable actuar con rapidez, sin embargo muchas veces es difícil contar con imágenes durante un evento de emergencia, ya que generalmente estas son solicitadas una vez que el evento ya ha ocurrido, perdiendo de este modo valiosos datos científicos. En el caso de las inundaciones es factible pronosticar un evento, permitiéndonos configurar futuras adquisiciones de imágenes satelitales con anticipación. Por lo tanto el plan propuesto en este trabajo, responde a la necesidad de tener un pronosticador (modelo hidrológico) y un sistema inteligente de toma de decisiones que juntos nos permitan planificar adquisiciones de imágenes satelitales en el menor tiempo posible.

En este trabajo se implementó un modelo de onda cinemática de complejidad reducida para pronosticar posibles eventos de inundación y optimizar el tiempo de respuesta. Los resultados demostraron la capacidad del modelo para replicar el comportamiento del proceso de escurrimiento sobre zonas con poca pendiente. El modelo mostró una buena estabilidad numérica y un adecuado proceder respecto a los principios hidráulicos tales como la conservación de masa y conectividad de flujo. Por otro lado se abordó el problema de planificación de imágenes satelitales usando técnicas de Inteligencia Artificial, a través del desarrollo de un prototipo de herramienta que permite planificar potenciales adquisiciones vinculadas a eventos de emergencias. Se utilizaron técnicas de planificación clásica y se trabajó con el algoritmo de búsqueda *Best-First* soportado por el planificador Metric-ff, donde los dominios y problemas fueron especificados en el lenguaje PDDL. El planificador Metric-ff demostró un buen rendimiento en las pruebas experimentales realizadas soportando correctamente los criterios de optimización (métricas) lo cual es relevante en este trabajo.

Palabras Claves: hidrología, modelos, inundación, planificación, imágenes satelitales, inteligencia artificial

Abstract

In recent years, Earth observation from space has experienced a rapid development, becoming essential in the monitoring of high impact natural processes. Meanwhile, Space technology has a great potential related with the assessment of damages caused by emergency situations. Within the emergency context time plays a significant role.

However it is often difficult to access to imagery during an emergency since they are generally requested once the event has already occurred, generating lost of science data. In the particular case of flooding, it is rather possible to predict an event, allowing us to set up in advance future acquisitions of satellite images.

Taking the former into account, this proposal was built in order to forecast affected areas by a hydrological model application and the implementation of an intelligent system to select the best acquisitions that would allow us to plan the acquisition process in the shortest time.

This work implements a Reduced Complexity Kinematic Wave Model to predict potential flood events and optimize time responses. The results demonstrated the model's ability to replicate the process of runoff behavior over areas with little slope. The model showed good numerical stability taking into account hydraulic principles such as mass conservation and flow connectivity.

On the other hand the imagery planning problem was addressed using AI techniques, through the development of a prototype tool that gives the opportunity to plan acquisitions related with emergencies events. Classical planning techniques were applied and we worked with the Best-First search algorithm. The last one is supported by the Metric-FF planner where Domains and Problems were specified in the PDDL language. The Metric-FF planner showed good performance in experimental tests and supports adequately the optimization criteria (metrics) which are relevant for this work.

Keywords: hydrology, models, flood, planning, satellite images, artificial intelligence

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Objetivo General	16
1.2. Objetivos específicos	16
2. Hidrología	17
2.1. Antecedentes de modelos hidrológicos	18
2.1.1. Modelos 2D	19
2.1.2. Elección del modelo adecuado	20
2.2. Sistema hidrológico	21
2.3. Caracterización del área de estudio	23
2.4. Modelo desarrollado	28
2.4.1. Estructura del modelo de simulación de inundación	28
2.4.2. El canal	30
2.4.3. Planicie	32
2.4.4. Interacción planicie-canal	34
2.5. Implementación	36
2.5.1. Modelo de Elevación Digital	36
2.5.2. Identificación del río	38
2.5.3. Modelado del río (obtención de sus parámetros principales)	42
2.6. Evaluación y resultados	47
2.6.1. Pruebas realizadas sobre el río aislado	47
2.6.1.1. Prueba 1: Montaña	48
2.6.1.2. Prueba 2: Planicie Alta	49
2.6.1.3. Prueba 3: Planicie Media y Baja	50
2.6.1.4. Prueba 4: 10 días de ejecución sobre montaña	52
2.6.2. Pruebas realizadas sobre la planicie aislada	53
2.6.3. Caso completo: unión del río y la planicie	56
2.7. Resumen de resultados	60

3. La planificación en inteligencia artificial	61
3.1. Introducción	61
3.1.1. Antecedentes	62
3.1.2. La planificación en la actualidad	63
3.2. Planificación clásica	64
3.2.1. Lenguajes de especificación	65
3.2.1.1. Planning Domain Definition Language - PDDL	65
3.3. Problema de planificación	67
3.3.1. Motivación	68
3.3.2. Descripción	69
3.3.3. Especificación	71
3.4. Herramientas y datos utilizados para la implementación	74
3.4.1. Características del satélite Radarsat	74
3.4.2. Software SaVoir	79
3.4.3. Planificador Metric-FF y algoritmos de búsqueda	82
3.5. Implementación: Dominio y Problemas	85
3.5.1. Especificación del dominio en PDDL	86
3.5.2. Especificación del problema en PDDL	90
3.6. Pruebas y Resultados	92
3.6.1. Evaluar la salida dependiendo del total de área cubierta	92
3.6.2. Evaluar la salida dependiendo del modo de adquisición	93
3.6.3. Evaluar la salida dependiendo del porcentaje del <i>swath</i> que cubre el área de interés	95
3.6.4. Evaluar la salida dependiendo de la prioridad de la región	96
3.6.5. Extensión del dominio a nuevos sensores y satélites	99
3.6.6. Evaluar la salida dependiendo de la longitud del plan	102
3.6.7. Ampliación de dominio: unión de adquisiciones	104
3.7. Resumen de resultados	108
4. Sistema integrado	110
4.1. Arquitectura	110
4.2. Escenario integrado	112
4.3. Resumen	115
5. Conclusiones	117
5.1. Líneas futuras	119
Bibliografía	120

A. Anexo	131
A.1. Dominio y Problema en PDDL	131
A.2. Heurísticas	136
A.2.1. Heurística del Plan Relajado	137
A.3. Algoritmos “Primero el mejor” y “Escalada”	139

Lista de Figuras

2.1. La cuenca como un sistema hidrológico	22
2.2. Perfil longitudinal del río Bermejo	24
2.3. Área de estudio	26
2.4. Vista del canal principal y la llanura de inundación	29
2.5. Principales procesos de flujo de desbordamiento	30
2.6. Ilustración gráfica del canal y las variable de modelado	31
2.7. Ilustración de las oscilaciones “tablero de ajedrez” entre dos celdas adyacentes	32
2.8. Representación gráfica de intercambio de flujo entre celdas adyacentes en la planicie	33
2.9. Representación gráfica de las variables de modelado de la planicie	34
2.10. Representación gráfica de flujo de intercambio entre la planicie y el río	35
2.11. DEM del área de estudio	37
2.12. Metodología de remuestreo del DEM	37
2.13. Altura original vs. altura ajustada de las celdas de la planicie atravesada por el río	38
2.14. Diagrama de flujo para extraer información hidrológica desde ArcGIS	39
2.15. Cálculo de la dirección de flujo sobre el DEM	40
2.16. Cálculo de acumulación de flujo sobre el DEM	41
2.17. Río digitalizado	42
2.18. Fragmento de comparación realizada entre el vector río y el DEM	42
2.19. Representación gráfica del cálculo de la altura del lecho del río de la celda (i, j)	43
2.20. Altura original del lecho del río a lo largo de su recorrido	43
2.21. Altura original del río vs. altura obtenida por aproximación de cuadrados mínimos	44
2.22. Altura de los pixeles de la planicie atravesados por el río vs. altura del lecho del río	44
2.23. Representación gráfica de diferentes longitudes del canal en un pixel de 1km^2	44
2.24. Representación gráfica de la longitud del río por pixel	45
2.25. Pendiente del río	46
2.26. Ubicación geográfica de encajonamiento del río	46
2.27. Ancho del río a lo largo de su recorrido	47
2.28. Ubicación de puntos geográficos donde se realizaron las pruebas del río	48

2.29. Avance de frente de onda en montaña	49
2.30. Tasa de cambio del espacio con respecto al tiempo en montaña	49
2.31. Avance de frente de onda en la planicie alta	50
2.32. Avance de frente de onda en la planicie media y baja	51
2.33. Curvas de velocidades para las dos tipos de perturbaciones en todos los puntos de prueba	51
2.34. Variación del volumen de agua total en el tiempo. Tiempo de ejecución, 10 días	52
2.35. Tasa de velocidad para perturbaciones efectuadas sobre montaña	53
2.36. Vista de distintos ángulos de la ubicación de lluvia simulada	54
2.37. Resultados obtenidos sobre la planicie, para distintos tiempos de simulación	54
2.38. Composición color con distintos períodos de simulación sobre la planicie	55
2.39. Composición color para un tiempo de simulación de 30 días sobre la planicie	56
2.40. Tiempos de ejecución obtenidos en las distintas simulaciones realizadas en planicie	57
2.41. Gráfico comparativo para el análisis de crecidas del río Bermejo.	57
2.42. Volumen de agua (m ³) del río, de la planicie y el total durante el tiempo de simulación	58
2.43. Volumen de agua (m ³) del río, de la planicie y el total durante el tiempo de simulación	58
2.44. Mapa: ubicación geográfica de las zonas de desborde del río Bermejo	59
3.1. Esquema general de un problema de planificación	65
3.2. Geométrica de una tira de adquisición de un satélite	70
3.3. Dirección de observación de RADARSAT	76
3.4. Órbitas ascendentes y descendentes de RADARSAT	76
3.5. Ciclo orbital de 24 horas de RADARSAT usando el modo ScanSAR	77
3.6. Rango de ángulos de incidencia de RADARSAT	78
3.7. Modos y posiciones del haz de RADARSAT-1	78
3.8. Menú para establecer la ventana de planificación en el software SaVoir	80
3.9. Menú para crear el área de interés con el software SaVoir	80
3.10. Seleccionar el satélite y los sensores de interés en el software SaVoir	81
3.11. Vista del diagrama de Gantt y las variables de salidas	82
3.12. Estados posibles para adquirir imágenes satelitales	89
3.13. Estados donde no es posible adquirir ambas adquisiciones de imágenes	89
3.14. Vista de la planificación para un escenario establecido	91
3.15. Archivo <i>XML</i> y variables de salidas	91
3.16. Vista de la planificación para el escenario establecido	93
3.17. Solución encontrada por el planificador evaluada por el total de área cubierta	93
3.18. Solución encontrada por el planificador evaluada con respecto al modo de adquisición	94
3.19. Solución evaluada por criterios de optimización combinados	95
3.20. Comparación de distintos planes dependiendo de la métrica establecida	96
3.21. Solución evaluada respecto al porcentaje del <i>swath</i> que cubre el área de interés	96

3.22. Regiones de interés con distintos niveles de prioridad	98
3.23. Diagrama de Gantt: posibles adquisiciones planificadas sobre las regiones de interés	98
3.24. Diagrama de Gantt: imágenes seleccionadas evaluadas por las prioridades de las regiones	98
3.25. Mapa con las adquisiciones seleccionadas sobre las regiones de interés	99
3.26. Planificación de potenciales adquisiciones combinando satélites, sensores y modos	101
3.27. Adquisiciones de Radarsat-2 en el primer día de planificación	101
3.28. Adquisiciones seleccionadas organizadas por modo de adquisición y agrupadas por día	102
3.29. Mapa con las adquisiciones seleccionadas sobre la Cuenca Baja del río Bermejo	102
3.30. Diagrama de Gantt y mapa con las 5 adquisiciones seleccionadas	103
3.31. Diagrama de Gantt y mapa con las 5 adquisiciones seleccionadas	104
3.32. Diagrama de Gantt de las potenciales adquisiciones sobre la Cuenca Media del río Bermejo	105
3.33. Imágenes seleccionadas por el planificador: Diagrama de Gantt y mapa	106
3.34. Adquisiciones seleccionadas luego de la técnica de unificación	108
4.1. Esquema de la arquitectura del sistema integrado	111
4.2. Vector generado a partir de las zonas pronosticadas por el modelo hidrológico.	112
4.3. Curvas de prioridad sobre las regiones de interés dependiente del tiempo	114
4.4. Diagrama de Gantt: potenciales adquisiciones sobre las regiones de desbordamiento	114
4.5. Mapa y diagrama de Gantt de las imágenes seleccionadas sobre las regiones de desborde	115
A.1. Algoritmo para la expansión del grafo de planificación relajado	137
A.2. Algoritmo para la extracción del plan relajado	138
A.3. Pseudocódigo del algoritmo “primero el mejor”	139
A.4. Pseudocódigo del algoritmo “escalada”	139

Lista de Tablas

2.1. Resultados de los casos de prueba sobre el río. Tiempo de ejecución, 1 día	52
2.2. Resultados de perturbaciones en zona montañosa sobre el río. Tiempo de ejecución, 10 días	53
3.1. Modos de adquisición del sensor SAR del satélite Radarsat-2	79
3.2. Valores del área real utilizada por los modos de adquisición planificados	97
3.3. Modos de adquisición del sensor PALSAR del satélite ALOS	100

Capítulo 1

Introducción

La información en la actualidad es esencial en casi todos los aspectos de la vida moderna y para cada actividad humana es producida y almacenada en enormes cantidades. Un caso particular de esto son los datos adquiridos por instrumentos científicos de Misiones Espaciales de Observación de la Tierra desarrollados para el monitoreo de recursos naturales y el estudio de emergencias.

La observación de la Tierra desde el espacio ha experimentado en los últimos años un rápido desarrollo, convirtiéndose indispensable en el monitoreo de procesos naturales de gran impacto para nuestro planeta. El número de aplicaciones de estas nuevas técnicas aumenta y las aplicaciones son extendidas a múltiples y diferentes campos. Todo esto siempre basado en la enorme cantidad y variedad de datos de que se dispone gracias a estas misiones espaciales.

Además de monitorear el ambiente los sensores espaciales producen información valiosa para propósitos de prevención en diferentes escalas espaciales y temporales. Debido a la gran cobertura espacial y una buena revisita temporal, los satélites poseen una clara ventaja comparados con otras fuentes de información más convencionales, como la fotografía aérea o los trabajos de campo (Chuvieco, 2006). En la práctica estos últimos se están tornando en métodos de calibración y validación de los productos. Por lo que podríamos decir que si bien en algunos sentidos los sustituye en otros los complementa (por ejemplo: la alta granularidad temporal de algunos estudios de campo no es posible desde instrumentos espaciales).

Las características de estos instrumentos en algunos casos permiten detectar grandes espacios, proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos, esta característica es valiosa sobre todo en países de gran superficie, como Argentina que es un país extenso y en grandes sectores poco poblados. Las características orbitales, además permiten adquirir imágenes repetitivas de toda la Tierra, en condiciones comparables de observación, lo que resulta idóneo para abordar estudios multitemporales.

Los satélites, además, ofrecen información sobre regiones no visibles del espectro, los sensores óptico-electrónicos facilitan imágenes sobre tipos de energía del infrarrojo medio y térmico o las microondas. Estas bandas del espectro proporcionan una valiosa información para estudios medio ambientales, como por ejemplo: la detección de focos de altas temperaturas útiles para delimitar incendios forestales con bastante precisión utilizando el canal correspondiente al infrarrojo medio (Chuvieco, 2006).

Los datos satelitales son una de las pocas fuentes de información propiamente globales, ya que los sistemas orbitales permiten tomar información de casi todo el planeta. Es decir, brindan una fuente homogénea de datos para todo el planeta, lo que permite su fácil inclusión en estudios globales y resulta de enorme trascendencia para entender los grandes procesos que afectan al medio ambiente de la Tierra (Chuvieco, 2006).

Es evidente que la tecnología espacial tiene un gran potencial lo que implica un creciente papel, entre otras cosas, en la evaluación de daños causados por situaciones de emergencias. Al mismo tiempo, la conciencia y comprensión de los beneficios que aportan las aplicaciones espaciales para la gestión de desastres (más allá de los sistemas de satélites conocidos dedicados a las previsiones meteorológicas), ha crecido significativamente. En particular, los mapas satelitales y los sistemas de información geográfica (SIG) se utilizan regularmente en la respuesta a emergencias y ayuda humanitaria como consecuencias de desastres naturales (Pisano, 2005).

En los últimos años se están intensificando las actividades y estudios relativos al espacio. Una serie de iniciativas se están llevando a cabo a través de cooperaciones inter-institucionales, en particular en la gestión de desastres y la salud pública (Pisano, 2005)

Tras la Conferencia UNISPACE III, celebrada en Viena, Austria, en julio de 1999, la Agencia Espacial Europea y la Agencia Espacial Francesa (ESA y CNES, respectivamente) elaboraron la Carta Internacional sobre el Espacio y las Grandes Catástrofes (CONAE se convirtió en miembro de la Carta en Julio del 2003). La Carta internacional tiene como objetivo proporcionar un sistema unificado de adquisición y entrega de datos espaciales, dedicado a los afectados por catástrofes naturales o antropogénicas. Cada agencia miembro ha comprometido sus recursos para apoyar las disposiciones de la Carta, y así ayudar a mitigar los efectos generados por las catástrofes sobre la vida de las personas y los bienes (<http://www.disasterscharter.org/web/charter/home>, 2011).

Ante situaciones de grandes catástrofes se puede invocar a la Carta a través de un protocolo de activación que podría dividirse en cuatro etapas. La primera etapa es de “movilización”, la cual se refiere a la detección de un evento de desastre y a la solicitud de aprobación para activar la Carta, esta etapa suele tener una duración de 1 día. La segunda etapa es de “adquisición”, en la cual se planifica el primer pedido de imágenes, para su posterior captura y descarga, esta etapa suele demorar 2 días. La tercera etapa relacionada al pre-procesamiento de los datos crudos y su transferencia a quien corresponda, tienen una duración de horas (un tercio de día aproximadamente). Por último la cuarta etapa, identificada como “información de crisis” se inicia en un tiempo mínimo de 12 hs. y se extiende durante el período necesario para la cobertura de la crisis. En esta etapa se realiza la creación de mapas y productos de valor agregado relevantes para el tipo de desastre tratado.

Como puede verse en esta estructura los tiempos son determinantes frente a una situación de emergencias. Los satélites de observación de la Tierra requieren de una ventana de tiempo mínima (dependiendo del satélite, esta varía de manera significativa, típicamente entre 6 hs. y 1 semana) para configurar sus futuras adquisiciones, por lo tanto es importante reducir los tiempos a la hora de programar los pedidos de adquisiciones, evitando de este modo perder pasadas relevantes del satélite.

En el caso de que el pedido de imágenes no sea de carácter urgente, también existe un cronograma de planificación que un usuario al realizar una solicitud debe tener en cuenta. En estos casos el cronograma de adquisiciones para cada día se hace típicamente con una o dos semanas de antelación.

Debido al amplio grado de libertad de adquisición que actualmente brindan los satélites, determinar cuales son los productos que es conveniente adquirir para tratar una dada emergencia es un problema de creciente importancia. Esta selección de productos está limitada por dos cuestiones fundamentales: recursos físicos y recursos temporales.

Los recursos temporales, como se mencionó anteriormente, están relacionados al uso y planificación de imágenes satelitales frente a situaciones de emergencias.

Los recursos físicos hacen referencia a la capacidad de almacenamiento sobre el satélite y a los recursos computacionales en las estaciones terrenas para el posterior procesamiento de datos. La enorme cantidad de datos junto con las diversas posibilidades para su procesamiento hace que el tiempo necesario para generar productos de valor agregado sea grande.

Argentina es un país fuertemente afectado por inundaciones. De acuerdo al reporte del ISDR (International Strategy for Disaster Reduction - <http://www.preventionweb.net/english/countries/statistics/?cid=7> (2011)) las inundaciones son el desastre natural que más afecta a nuestro país, causando muertes y grandes pérdidas económicas. La Carta ha sido activada en varias ocasiones por eventos de este tipo en nuestro país. Un pronóstico de inundación preciso y temprano es esencial para la toma de decisiones con respecto a la gestión de inundaciones. Generalmente, los daños son reducidos significativamente si la alerta de inundación llega a tiempo y es precisa.

Las aplicaciones espaciales de valor agregado típicamente dependen de algún modelo físico del fenómeno de estudio al que se le introducen datos provistos por los instrumentos a bordo de los satélites. Este es el caso de las aplicaciones hidrológicas que están basadas en datos de observaciones de la tierra, entre otros, para gestionar inundaciones en términos de mapas de riesgo y previsión de inundación. Parámetros tales como la humedad del suelo, la pendiente del terreno pueden ser estimados desde datos satelitales y usados como entradas a modelos hidrológicos e hidráulicos.

Durante un evento de inundación, imágenes de radar pueden ser usadas para monitorear y trazar un mapa de la extensión de la inundación. Un inconveniente es que muchas veces es difícil contar con imágenes durante la inundación, ya que generalmente estas son solicitadas una vez que el evento ya ha ocurrido, perdiendo de este modo valiosos datos científicos. Si bien es importante disponer de datos satelitales después de ocurrido un evento de inundación que nos permitan analizar las zonas afectadas, es relevante monitorear también el evento antes y durante. Esto sería posible con una herramienta que permita prever la necesidad, simulando el comportamiento de la inundación podríamos planificar la toma de imágenes con anticipación.

El plan propuesto entonces, responde a la necesidad de tener un pronosticador (modelo hidrológico) y una sistema inteligente de toma de decisiones que juntos nos permitan simular eventos de inundación y obtener datos de gran utilidad en el menor tiempo posibles.

El modelo hidrológico se aplicó sobre la cuenca del río Bermejo, la cual presenta problemas particulares, pero la metodología general desarrollada permite aplicar el modelo a otras áreas. Por otro lado, se abordó el problema de planificación de imágenes satelitales usando técnicas de Inteligencia Artificial (IA).

Diferentes técnicas de IA aplicadas a misiones espaciales han sido el enfoque de estudio de muchos investigadores en los últimos años. Las misiones espaciales generan problemas desafiantes para la comunidad de

planificación y programación (Planning and Scheduling - P & S) (Cesta et al., 2003). P & S automatizado es el área de Inteligencia Artificial que refiere a modelos y técnicas para sintetizar y mantener planes de acciones, estrategias de ejecución y políticas de asignación de recursos las cuales nos permiten realizar tareas complejas. P & S tiene como propósito decidir como y cuando actuar a fin de satisfacer algunas metas. Aunque las fronteras son siempre difíciles de determinar, la planificación es comúnmente asociada con decidir “como actuar” (cuales tareas realizar a fin de satisfacer metas) y la programación es comúnmente asociada con decidir “cuando actuar” (en que tiempo y con qué recursos) (Cesta & Milani, 2006). El presente estudio se enmarca en el área de planificación de la IA.

Es posible distinguir dos enfoques para los problemas de planificación: en el primero, llamado orientado a acciones (o planificación clásica), el mundo es visto como una entidad que puede estar en diferentes estados, y en el cual un estado puede ser cambiado mediante acciones. En el segundo enfoque, basado en líneas de tiempo (timeline-based) el mundo es modelado en términos de un conjunto de funciones de tiempo que describen su evolución sobre un intervalo temporal.

El problema de planificación es encontrar una secuencia parcialmente ordenada de las acciones que aplicadas a un estado inicial alcanzan un estado final satisfaciendo eventualmente algunas condiciones. En la planificación clásica el algoritmo de planificación busca en el espacio de estados para encontrar uno en el cual una meta dada es alcanzada (Fikes & Nilsson, 1971). En este trabajo se utiliza planificación orientada a acciones para resolver el problema de planificación. La literatura científica sobre problemas de planificación y programación para el espacio es amplia, algunos consideran sólo problemas del satélite y horizontes de planificación cortos, otros más complejos incluyen la transmisión de imágenes y contacto con las estaciones terrenas (Bianchesi & Righini, 2008). Otro modelo más complicado, similar a este se estudió por Frank et al. (2001), quién desarrolló un algoritmo estocástico avaro.

Bensana et al. (1999) y Vasquez & Hao (2001) consideraron problema de planificación y programación de un sólo satélite relacionado a un satélite óptico. Lemaitre et al. (2002) ilustró varias técnicas algorítmicas para los problemas de planificación y programación de la constelación de Pleiades. Problemas de órbita simple o de un sólo satélite también fueron estudiados por Wolfe & Sorensen (2000) y por J.F. & G. (2005) quién resolvió instancias pequeñas con un número de 50 demandas. La tecnología SAR fue considerada por Harrison et al. (1999), quién resolvió casos con un sólo satélite, 50 demandas y un horizonte de tiempo de pocos minutos. Globus et al. (2003) presentó un algoritmo genético para un problema con dos satélites en un horizonte de la planificación corto, sin restricciones de memoria y transmisión.

Este trabajo está dividido en dos partes principales desarrolladas en los capítulos 2 y 3. En el capítulo 2 de hidrología se investigan enfoques de diferentes modelos hidrológicos para inundación de planicie, se especifica, implementa y aplica un modelo seleccionado. Se simulan distintos escenarios sobre el río Bermejo y se exponen los resultados. El capítulo 3 introduce los conceptos de la planificación en la inteligencia artificial. Se describe y especifica el problema de planificación y las técnicas utilizadas para su resolución. Se exponen algunos problemas de ejemplo y se muestran sus resultados. En el capítulo 4 se expone un escenario de prueba y un bosquejo de la arquitectura del sistema general que integra los sistemas presentados en los dos capítulos anteriores. Por último

en el capítulo 5 se presentan las conclusiones generales.

1.1. Objetivo General

Este trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de un prototipo de herramienta que permita planificar potenciales adquisiciones de imágenes satelitales vinculadas a eventos de emergencias. En particular, aplicar dicha herramienta sobre un escenario de inundación simulado a partir del desarrollo e implementación de un modelo hidrológico.

1.2. Objetivos específicos

Para llevar a cabo el proyecto se consideraron algunos objetivos específicos, tales como:

- Investigar diferentes modelos de inundación de planicie.
- Implementar un modelo hidrológico de simulación de inundación que permita pronosticar áreas afectadas.
- Aplicar el modelo hidrológico sobre una cuenca con disponibilidad de datos, en particular sobre la cuenca del río Bermejo.
- Analizar la estabilidad numérica del modelo y el principio de conservación de agua.
- Investigar técnicas de planificación dentro del área de inteligencia artificial.
- Desarrollar una herramienta de planificación de imágenes satelitales que permita seleccionar un subconjunto de posibles observaciones restringido por criterios de optimización.
- Demostrar la utilidad de las herramientas de planificación de adquisiciones satelitales frente a situaciones de emergencias.

Capítulo 2

Hidrología

El agua es la sustancia más abundante en la Tierra, es el principal constituyente de todos los seres vivos y es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre. También es un factor clave en la climatización de nuestro planeta para la existencia humana y en la influencia en el progreso de la civilización. La hidrología, que cubre todas las fases del agua en la Tierra, es una materia de gran importancia para el ser humano y su ambiente (Chow et al., 1994).

Se denomina hidrología (del griego *hydor-*, agua) a la disciplina científica dedicada al estudio de las aguas de la Tierra, incluyendo su presencia, distribución (espacial y temporal), circulación a través de la atmósfera y sus diferentes fases, lo que se denomina ciclo hidrológico. Trata, además, las propiedades químicas y físicas del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre (Marcano, 2011).

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se les entienda en su totalidad. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de *sistema* (Chow et al., 1994).

El objetivo primario de la hidrología es el estudio de las interrelaciones entre el agua y su ambiente. Ya que la hidrología se interesa principalmente en el agua localizada cerca de la superficie del suelo, se enfoca particularmente en aquellos componentes del ciclo hidrológico que se presentan en esa zona. Esto incluye, entre otras, las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y la infiltración. Los diferentes aspectos de estos fenómenos son estudiados en sus varias sub-disciplinas (Marcano, 2011).

La hidrología se nutre de disciplinas como la geología, química, edafología y fisiología vegetal, empleando muchos de sus principios y métodos. Los investigadores en el campo usan mucho (y cada vez más) las simulaciones computarizadas de los sistemas hidrológicos naturales y las técnicas de detección remota (Marcano, 2011).

Por otro lado, la integración de la hidrología con la geografía matemática, en especial a través de los sistemas de información geográfica, ha conducido al uso imprescindible del computador en el procesamiento de información existente y en la simulación de ocurrencia de eventos futuros (<http://es.wikipedia.org/wiki/Hidrologia>, 2011).

La investigación hidrológica es importante para el desarrollo, gestión y control de los recursos hídricos. Sus aplicaciones son muchas, incluyendo el desarrollo de sistemas de irrigación, control de inundaciones y erosión

de suelos (Marcano, 2011). Se ha desarrollado como ciencia en respuesta a la necesidad de comprender el sistema hídrico de la Tierra y su estudio es fundamental para prevenir eventos hidrológicos extremos, como las inundaciones.

2.1. Antecedentes de modelos hidrológicos

En los últimos años la demanda de predicción de inundaciones causadas por eventos de diferentes períodos de retorno o en múltiples escenarios se ha incrementado notablemente (Ashley et al., 2005; Dawson et al., 2005; Hall et al., 2005; Middelkoop et al., 2004).

Ya desde 1962, soluciones numéricas de fórmulas matemáticas establecidas (Boussinesq, 1877, 1897; Saint-Venant, 1871) fueron propuestas, desarrolladas e implementadas como una alternativa viable a la construcción de maquetas físicas a escala reducida para simular y predecir los flujos de río y la llanura de inundación; por ejemplo Yalin (1971) (Neil M. et al., 2005).

La predicción de eventos naturales excepcionales y sus consecuencias, implica el uso de herramientas de modelado. Estas herramientas se basan muchas veces en observaciones previas a la ocurrencia del evento. Frente a la escasez de suficientes observaciones históricas, los avances en la teledetección y el poder de cómputo han convertido a los modelos numéricos distribuidos en una solución cada vez más atractiva donde son requeridas las predicciones espaciales del potencial daño de futuros episodios de inundación (Neil M. et al., 2007). Desde la primera propuesta realizada por Zanobetti et al. (1970) los métodos para predecir la inundación de llanura utilizando métodos de celdas de almacenamiento se han convertido en justificadamente populares. Estos métodos discretizan las llanuras de inundación con una grilla regular cartesiana (o raster) y calculan los flujos de agua entre celdas de acuerdo con algunas fórmulas de flujo uniforme, como las ecuaciones de Manning. A cada celda se le asigna un valor de elevación y su estado dentro de la grilla se actualiza en cada paso de tiempo de acuerdo al flujo de agua que ingresa y sale de cada celda. Para muchos de estos modelos el flujo en el canal (río) se calcula utilizando alguna de las ecuaciones 1D de Saint-Venant, y cuando el flujo supera la profundidad del cauce lleno, el agua se dirige hacia las celdas de almacenamiento de la llanura de inundación (Paul D. et al., 2010).

Sin embargo, el modelado de sistemas de inundación río-llanura y la elaboración de evaluaciones de riesgo de inundación a escala espacial y temporal no es una panacea. El objetivo de desarrollar y utilizar modelos que sean “lo más realista posible” debe equilibrarse con una serie de otras consideraciones importantes (Beven, 2001), incluyendo: la carga computacional de los cálculos hidrodinámicos, la inversión en la recopilación de datos a medida y relevantes, la puesta a punto del modelo y los requerimientos del usuario final. Como tal, los métodos de modelado de inundación deben ser confiables, factibles en términos de costo computacional y datos de entrada, y deben ser capaces de generar la información hidráulica requerida en un formato adecuado y en un nivel de detalle suficiente (CADAM, 2000; Halcrow Group Ltd, 2004; Smith et al., 2004).

Los modelos hidráulicos pueden ser clasificados según el número de dimensiones en las que representan el dominio espacial y los procesos de flujo en el mismo.

En caso de que las condiciones de flujo se pudieran describir razonablemente en una dimensión (es decir, el

flujo del canal por debajo del límite de desbordamiento), estos enfoques se basarían en discretizaciones de las ecuaciones de diferencias finitas de Saint-Venant (Preissmann, 1961). Sin embargo, se reconoció rápidamente que canales verdaderamente rectos en los cuales el flujo pueda considerarse estrictamente unidimensional (de acuerdo con la hipótesis de Saint-Venant) rara vez son observados en la naturaleza, especialmente cuando se supera la profundidad del cauce lleno. Cuando ocurren episodios de inundación, el agua deja de ser contenida solamente en el canal del río principal y se derrama sobre las llanuras de inundación adyacentes con poca pendiente, la situación se vuelve mucho más compleja y no puede ser representado de manera satisfactoria por simples esquemas unidimensionales (Neil M. et al., 2005).

Si bien los códigos 1D son computacionalmente muy eficientes, ellos sufren una serie de inconvenientes cuando son aplicados a flujos de planicie, incluyendo la incapacidad para simular la difusión lateral de la onda de inundación, la discretización de la topografía como secciones transversales (y no como una superficie) y la subjetividad de localización y orientación de la sección transversal (Samuels, 1990). En respuesta a tales limitaciones teóricas, se han desarrollado técnicas de modelado de dos dimensiones capaces de simular dinámicamente con precisión la inundación de planicie (Zanobetti et al., 1970, 1968).

Varios trabajos sobre la calibración y validación de modelos 2D de inundación de ríos de planicie (Aronica et al., 2002; Bates & De Roo, 2000; Bates et al., 1998; Feldhaus et al., 1992; Horritt, 2000; Horritt & Bates, 2001a,b; Romanowicz & Beven, 1997; Romanowicz et al., 1996), han demostrado como enfoques basados en rasters y métodos de elementos finitos puede utilizarse para reproducir el grado de inundación. La teledetección ha demostrado también ser una herramienta útil en el trazado de mapas de áreas inundables (Horritt et al., 2001) y por lo tanto, en la validación de modelos numéricos de inundación.

Los métodos más populares para el modelado hidráulico fluvial han sido soluciones de una y dos dimensiones de las ecuaciones de Saint-Venant (1871) que actualmente siguen siendo los modelos más poderosos y precisos, altamente utilizados por muchos paquetes de ingeniería, tales como MIKE11 (2003) y HEC-RAS (2002) (del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU.).

Los modelos utilizados recientemente reflejan un movimiento en los últimos años desde enfoques unidimensionales (HEC-RAS) hacia elementos finitos 2D (TELEMAC-2D desarrollado por Electricité de France) y modelos basados en raster (LISFLOOD-FP). El uso de mapas de sensado remoto de áreas inundables (Estrela, 1997; Horritt et al., 2001; Smith, 1997) para validar modelos de inundación (Horritt, 2000) ha influenciado fuertemente el desarrollo de tales códigos en los últimos años. La naturaleza 2D de mapas de inundaciones ha promovido el uso de modelos 2D. La alta resolución de datos de teledetección, especialmente de sistemas de radar de apertura sintética (SAR) (por lo general unas pocas decenas de metros), ha alentado a modelar con una mayor resolución espacial, y también ha fomentado la integración de modelos de elevación digital (DEM) con alta resolución en los modelos hidráulicos (Marks & Bates, 2000).

2.1.1. Modelos 2D

Enfoques simplificados de dos dimensiones se han desarrollado durante la última década para problemas de inundaciones fluviales (Bates & De Roo, 2000; Bechteler & Hartmaan, 1994; Dhondia & Stelling, 2002;

Estrela & Quintas, 1994; Romanowicz et al., 1996; Venere & Clausse, 2002) aprovechando la mayor disponibilidad de datos topográficos de alta precisión con resolución espacial fina.

Estas clases numerosas de sistemas 2D pueden ser ampliamente distinguidas ya sea como soluciones integrales de las ecuaciones de Saint-Venant para flujos de agua superficial (Chow & Ben-Zvi, 1973; Iwasa & Inoue, 1982; Katapodes & Strelkoff, 1979; Kawahara & Yokoyama, 1980; Zhang & Cundy, 1989) o aproximaciones simplificadas en las cuales los términos de inercia o “pendiente de aceleración” son omitidos de las ecuaciones de control (Cunge et al., 1980; Hromadka & Yen, 1986; Julien et al., 1995; Xanthopoulos & Koutitas, 1976; Zanobetti et al., 1970, 1968) para dar lo que se conoce a veces como un “modelo de inercia cero”.

A menudo, la descripción completa de flujo de agua superficial de Saint-Venant no es necesaria, por lo tanto los modeladores simplifican la ecuación completa de Saint-Venant dejando de lado términos de la ecuación de momento, siempre que resulte justificado por las condiciones físicas (Daluz Vieira, 1983; Moussa & Bocquillon, 1996, 2000; Ponce & Simons, 1977). En la mayoría de las aplicaciones prácticas del recorrido de la inundación en cauces naturales, los términos de aceleración en las ecuaciones de Saint-Venant se pueden despreciar, y el sistema se reduce a una ecuación parabólica: la ecuación de onda difusiva (Ponce, 1990).

En el caso particular de que el término de gradiente de presión pudiera también dejarse de lado, la onda difusiva se convierte en un modelo de onda cinemática. Por lo tanto, la onda difusiva puede ser considerada una aproximación de orden superior que la aproximación de la onda cinemática (Daluz Vieira, 1983; Ferrick, 1985; Katopodes, 1982; Ponce, 1990). La elección entre una onda cinemática o difusiva se hace a menudo por razones pragmáticas en que la ecuación completa de Saint-Venant necesita métodos numéricos complejos para la resolución de las ecuaciones diferenciales, y es demasiado costoso computacionalmente.

Por lo tanto, con el fin de simplificar el modelo de Saint-Venant, las fórmulas de flujo uniforme (es decir, Manning) o la ecuación de onda cinemática (Bates & De Roo, 2000; Jaber & Mohtar, 2002, 2003; Singh, 1994) fueron utilizadas en gran medida para simular el flujo de desbordamiento (ver síntesis en Bates & De Roo (2000)). El modelo de onda difusiva también se utilizó para modelar el recorrido de la inundación en canales cuando se produce el desbordamiento del río, como en el modelo CASC2D (Downer et al., 2002; Ogden, 2000; Ogden & Julien, 2002) y su reformulación y mejora en GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis, Downer & Ogden (2006)).

Se ha demostrado, para inundaciones fluviales, que estos modelos simplificados (es decir que usan ecuaciones de Saint-Venant reducidas) funcionan tan bien como los modelos completos de dos dimensiones en la predicción de inundación durante eventos dinámicos. Un plan similar ha sido adoptado, cada vez más, en paquetes comerciales de modelado (por ejemplo, JFLOW by JBA Ltd., FlowRoute by Ambiental and the RMS Ltd., UK Flood Risk Model)(Paul D. et al., 2010).

2.1.2. Elección del modelo adecuado

El objetivo de desarrollar y utilizar modelos precisos y confiables no sólo se basa en elecciones matemáticas, debe equilibrarse con una serie de otras consideraciones importantes (Beven, 2001), incluyendo el costo computacional de los cálculos hidrodinámicos y la disponibilidad de datos hidrológicos relevantes.

Los modelos de inundación deben ser viables en términos de que los datos de entrada que requieren se puedan obtener y deben ser capaces de generar la información hidráulica requerida en un nivel de detalle y formato adecuado (Smith et al., 2004). Sin embargo, las cantidades predichas por estos modelos, tales como la profundidad del agua y la descarga en el canal y en la llanura de inundación, deben ser reconocidos como inciertas (Aronica et al., 2002, 1998; Hunter et al., 2005; Pappenberger et al., 2005; Romanowicz & Beven, 2003; Romanowicz et al., 1994, 1996).

Por lo tanto, la elección del modelo de inundación adecuado (Saint-Venant, onda difusiva, onda cinemática, 1D o 2D, etc) no sólo depende de los términos que pueden ser omitidos de la ecuación de Saint-Venant, sino también de la disponibilidad y la exactitud de los datos de entrada, tales como la topografía, las propiedades hidráulicas del río y la zona de inundación, y los hidrogramas de crecidas. Debido a esto, las recientes investigaciones en hidráulica examinan enfoques de complejidad reducida (Hunter et al., 2007). Como tal, es la hipótesis de que los errores en la especificación de la topografía y los coeficientes de rugosidad, dominarán e influirán en los resultados del modelo en mayor medida que aquellos errores producto de la simplificación matemática (Bates & De Roo, 2000; Cunge et al., 1980; Hunter et al., 2007).

Está claro que el principal obstáculo al estudiar históricamente las inundaciones es la falta de datos hidrológicos y geográficos de la zona de inundación. Por lo tanto, el mejor modelo para simular los fenómenos de inundación será el más simple tal que proporcione la información requerida por el usuario, y se adapte razonablemente los datos disponibles (Hunter et al., 2007; Plate, 2002).

2.2. Sistema hidrológico

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, sin embargo pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de *sistema*. Un sistema es un conjunto de partes conectadas entre sí, que forman un todo (Chow et al., 1994). Para el modelado que nos interesa el ciclo hidrológico puede tratarse como un sistema cuyos componentes son: precipitación y escorrentía. Las otras fases del ciclo hidrológico (como la evaporación) no son tratadas en este trabajo.

El sistema hidrológico representa un sistema de depósitos del agua en el territorio de referencia así como las transferencias entre ellos. La descripción más sencilla del sistema hidrológico identifica tres depósitos: el agua de la atmósfera; el agua de los océanos y mares y; el agua sobre la superficie de la tierra y subterránea. Las principales transferencias a la atmósfera son representadas por la evaporación y la transpiración, y la transferencia de la atmósfera a la tierra por la precipitación. Conocer el funcionamiento de los sistemas hidrológicos permite anticipar los impactos, lo cual es fundamental para trazar objetivos en relación a la planificación y prevención (Protección Civil, 2011). El proceso de lluvia-escorrentía puede representarse como un sistema hidrológico en una cuenca.

Una cuenca es una extensión de tierra que drena hacia un lugar dado (por lo general la salida de la cuenca) donde el flujo de agua se une a otro cuerpo de agua, como un río, lago o mar (Chow et al., 1994).

La divisoria de aguas es una línea que separa la superficie de tierra, cuyo drenaje fluye hacia un río dado, de las superficies de tierra cuyos desagües corren hacia otros ríos. La lluvia es la entrada, distribuida en el

espacio sobre el plano superior, el caudal es la salida, concentrado en el espacio de la salida de la cuenca. La evaporación y el flujo subsuperficial también pueden considerarse como salidas, pero son comúnmente muy pequeños comparados con el caudal de salida durante una tormenta. La estructura del sistema es el conjunto de caminos de flujo sobre el suelo o subsuperficiales e incluye sistemas tributarios que eventualmente convergen para convertirse en caudal a la salida de la cuenca (Chow et al., 1994) (Figura 2.1).

Si la superficie y el suelo de la cuenca se examina en detalle, el número de caminos posibles resulta enorme. A lo largo de alguno de estos caminos, la forma, pendiente y rugosidad pueden cambiar continuamente y estos factores también pueden variar en el tiempo a medida que el suelo se humedece. De manera análoga, la precipitación varía aleatoriamente en el espacio y el tiempo. Debido a estas grandes complicaciones, en la mayoría de los casos, no es posible describir los procesos hidrológicos modelados detalladamente a partir de las leyes físicas. Si se utiliza el concepto de sistema, el esfuerzo se dirige hacia la construcción de un modelo que relacione entradas y salidas en lugar de llevar a cabo la extremadamente difícil tarea de una representación exacta de los detalles del sistema, los cuales pueden ser abstraídos desde un punto de vista práctico. Sin embargo, el conocimiento de los modelos basados en la física ayuda al desarrollo de un buen modelo y a la determinación de su precisión (Chow et al., 1994).

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir una salida. El modelo que se consideró de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; donde sus entradas y salidas son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas (Chow et al., 1994). Debido a los grandes progresos en la investigación, actualmente se puede simular el fenómeno hidrológico de modo muy complejo.

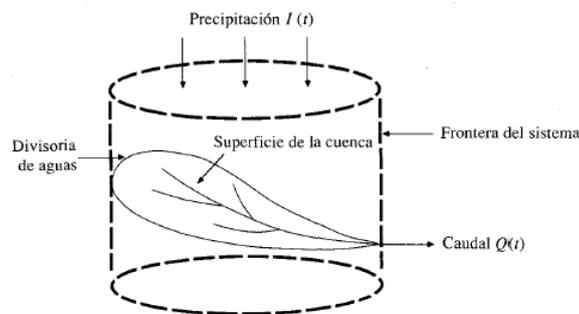


Figura 2.1: La cuenca como un sistema hidrológico. Fuente: Chow et al. (1994)

Las inundaciones se producen cuando la descarga del río es demasiado alta para ser alojada en el cauce normal. Cuando la descarga es demasiado alta, el río aumenta su caudal desbordando sus orillas e inunda las zonas de tierras bajas que lo rodean. Las áreas que se inundan son conocidas como llanuras de inundación. Los modelos de inundación de río se basan principalmente en sistemas hidráulicos, representando el flujo tanto en el canal como en la llanura de inundación.

Para resolver los procesos hidráulicos inducidos por la topografía de la llanura, un enfoque bidimensional es requerido. Estos modelos requieren, entre otras cosas, datos distribuidos de la topografía (Bates et al., 1998) y coeficientes de fricción (coeficiente de Manning) para la parametrización del modelo (Horritt, 2000). Datos que

la teledetección es capaz de proporcionar. Una dificultad reside en la determinación del coeficiente de rugosidad (n) aplicando la fórmula Manning, pues no hay un método exacto de seleccionar un valor n , es muy variable y depende de una cantidad de factores. El valor del coeficiente es más alto cuanto más rugosidad presenta la superficie de contacto de la corriente de agua.

2.3. Caracterización del área de estudio

El río Bermejo es un largo río de la Cuenca del Plata y son, junto con el río Pilcomayo, los principales afluentes del río Paraguay, que discurre por Bolivia y Argentina. El río es generalmente llamado Bermejo a pesar de sus diferentes nombres a lo largo de su recorrido y en general mantiene una dirección sudeste.

Su longitud es de 1.450 km y la superficie total de su cuenca es de 123.162 km^2 . La altitud de la fuente es de aproximadamente 3.600 msnm y su altura de desembocadura es de 58 msnm. Su descarga media mensual es irregular y varía dependiendo de la estación del año y la altura del río donde se mida el caudal. En la página de la Comisión Regional del río Bermejo (Comisión Regional del Río Bermejo - <http://www.corebe.org.ar/index.php> (2011)) pueden encontrarse series de datos de varios años organizadas por estación hidrológica. La imagen 2.3 muestra el área de estudio con el río Bermejo, su cuenca (divida en cuenca media y baja) y algunas estaciones hidrológicas ubicadas a lo largo de su recorrido. También pueden verse algunas imágenes que muestran como varía la geomorfología fluvial del río Bermejo desde su nacimiento hasta su desembocadura.

El río nace en una cadena montañosa conocida como Sierra de Santa Victoria, cerca de las coordenadas 57°30'W 64°00'14' 22° donde nace el río Santa Rosa. Desde la confluencia de éste y hasta las juntas de San Antonio, donde recibe al Grande de Tarija, el Bermejo forma parte de la frontera internacional entre Argentina y Bolivia. Ya en territorio argentino recibe varios tributarios por su margen derecha: el Iruya con su afluente el Pescado, el Blanco o Zenta, el Santa María, el Colorada, el San Francisco, gran colector de las aguas del borde de la Puna. El Iruya le aporta más del 70% del material sólido que el río transporta en suspensión aguas abajo, producto de la potencia erosiva de su cauce, que socava las altas barrancas de areniscas blandas. La estacionalidad e intensidad de las precipitaciones (900mm anuales) en la alta cuenca, que se concentran en verano, influyen sobre el grado de erosión (en especial donde los suelos desprovistos de vegetación quedan expuestos a la escorrentía) (Atlas, 1982).

El río es navegable para barcos de mediano porte en épocas de crecidas como febrero, julio y noviembre; su caudal al llevar muchos sedimentos da una coloración rojiza a sus aguas; de ahí el nombre castellano, y el guaraní “Ý-pytã”: agua-roja; mientras que en toba “Teuco” significa (el) río. La presencia de mucho sedimento (hasta 8 kg/m^3) hace que este río deposite grandes cantidades de tierra en las orillas formando “albardones” y ocasionalmente diques naturales que le hacen cambiar de cauce, quedando los lechos antiguos como depresiones anegadizas llamadas madrejones (http://en.wikipedia.org/wiki/Bermejo_River, 2011).

El río se desplaza de NNO a SSE y la pendiente media del cauce es de 0.2%. La figura 2.2 presenta el perfil longitudinal del río Bermejo.

Entre la Junta de San Francisco y Fortín Lavalle, el río prácticamente no recibe aportes laterales significativos. Hacia aguas abajo tiene aportes periódicos de algunos ríos y arroyos e incluso de esteros.

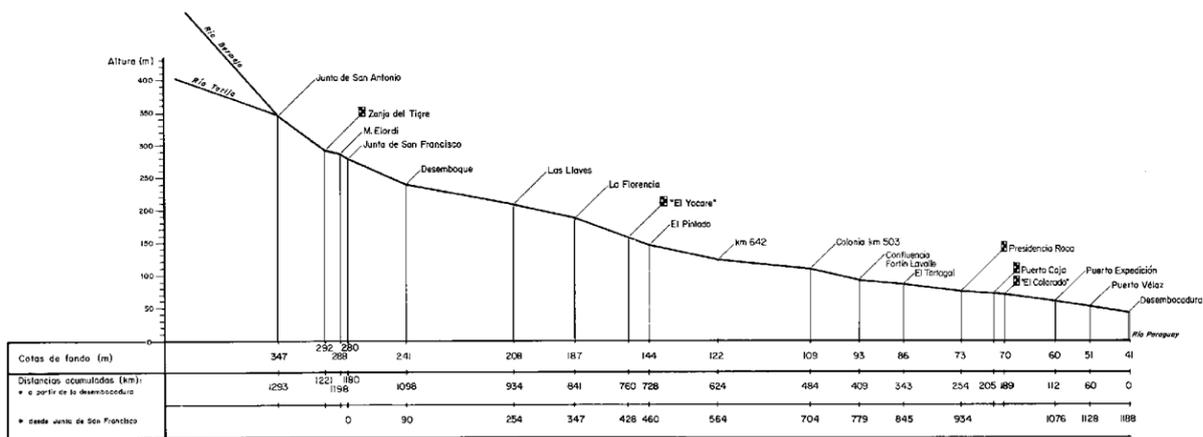


Figura 2.2: Perfil longitudinal del río Bermejo. Fuente: <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea22s/begin.htm> (1977)

Durante su recorrido se producen pérdidas por infiltración y desbordes en épocas de crecida. Por otra parte, en épocas de estiaje recibe aportes de aguas subterráneas. En un tramo de 150 km aguas abajo de la Junta de San Francisco el río Bermejo no tiene cauce definido, se divide en numerosos brazos y divaga en una playa muy amplia, cuya configuración cambia constantemente (<http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea22s/begin.htm> (1977)).

A unos 90 km aguas abajo de la Junta de San Francisco, en el paraje conocido como Desemboque se bifurca en dos cauces el Teuco y el Bermejito o antiguo cauce del río Bermejo. El cegamiento del antiguo cauce es un fenómeno fluvial realmente excepcional, ya que el Bermejo, abandonando su curso, se unió con el río Teuco, ubicado a unos 40 km al norte, para retomar su antiguo cauce en el lugar denominado Confluencia. La extensión del tramo abandonado es de aproximadamente 400 km. En esta zona el ancho del río es de unos 2000 m y hacia aguas abajo se va encauzando gradualmente, hasta convertirse prácticamente en un canal de 200 a 300 m de ancho y comienza a desarrollar grandes meandros, haciéndose cada vez más sinuoso.

En Confluencia, a unos 780 km aguas abajo de la Junta de San Francisco y 410 km de la desembocadura, se le acerca y une de manera difusa el antiguo cauce o Bermejito. En las proximidades de Presidencia Roca (Chaco), 254 km de la desembocadura, vuelve el cauce a tener una sección bien definida, su ancho es menor y las barrancas son cada vez más consistentes.

En la zona terminal, por último, vuelve el río a presentar barrancas bajas y sumergibles, desembocando en el Paraguay con un ancho de unos 170 m.

El arroyo Dobagán, denominado en su parte superior riacho Salado o Saladillo, recibe en épocas de crecida aguas del Bermejo. Su cauce a partir de Colonia km 505 (paralelo al del río Bermejo), se presenta bien definido y presenta tortuosidad. Su confluencia con el Bermejo se encuentra cerca de Colonia km 232 entre las localidades de Presidencia Roca (Chaco) y El Colorado (Formosa).

Aguas abajo, en la Provincia de Formosa, entre los kilómetros 155 y 125 aparece el riacho Alazán, de cauce bien definido, que lleva aguas en forma permanente por transfuencia del propio río Bermejo. En la zona de Colonia Coronel Dorrego en Chaco, entre Presidencia Roca y El Colorado, se produce el mismo fenómeno originando el riacho La Unión.

A la altura del km 100, el Bermejo, por su margen izquierda, recibe los aportes del arroyo Bellaco, desagüe natural del estero del mismo nombre (<http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea22s/begin.htm> (1977)).

Según [Daniele & Natenzon \(1988\)](#) pueden diferenciarse en la cuenca 3 ecorregiones:

- **Estepas Altoandinas:** Zonas de alta montaña de la cordillera Andina, por sobre los 4.500 msnm en el norte descendiendo hasta los 500 metros en la Patagonia. Presentan nieves permanentes, el clima es frío con alta heliofanía y grandes amplitudes térmicas diarias. Las temperaturas permanecen bajo cero durante ocho meses del año. Las precipitaciones oscilan entre los 100 mm y 200 mm de promedio anual en el norte y centro de la unidad aumentan hasta alrededor de 500 mm en el sur, caen en forma de nieve o granizo. Los vientos son fuertes, las heladas se producen todo el año, con excepción de los meses de enero y febrero en el sector extrapatagónico. La vegetación se diferencia en función de la latitud según sea la unidad vecina que ejerza su influencia. En el sector norte penetran las especies puneñas.
- **Bosques y Arbustales del Chaco Semiárido:** Los bosques y arbustales del Chaco semiárido se asientan sobre una llanura con escasa pendiente hacia el sureste. Los paisajes de modelado fluvial están casi totalmente cubiertos de bosques y sólo los antiguos cauces están ocupados por el pastizal, por donde penetró la colonización agrícola. Presenta un rango de precipitaciones anuales que disminuyen de este a oeste entre los 750 mm y los 450 mm de promedio. La temperatura media anual que disminuye desde los 23°C en el norte hasta los 19°C en el sur, no expresa la influencia de la estacionalidad, ésta queda evidenciada por la presencia en la región de la isoterma cerrada de los 47°C de temperatura máxima absolutamente, el mayor valor registrado en todo el país. Vegetación de tipo boscoso, con especies caducifolias y xerófilas adaptadas al periódico déficit hídrico anual. El bosque climático es el quebrachal. También hay bosques de palo santo hidrófilos en los bajos o formando galerías a lo largo de los cauces temporales, también abundan las cactáceas, las palmeras y en los suelos salinos del oeste y suroeste especies halófilas.
- **Bosques y Esteros del Chaco Húmedo:** El clima es subtropical templado con precipitaciones abundantes, veranos cálidos e inviernos templados. De este a oeste se acentúa la estacionalidad de las lluvias, que disminuyen desde los 1300 mm de promedio anual en el este a los 750 mm en el oeste. La temperatura media anual oscila en los 21,5°C. Se registra un promedio anual de 5 a 10 días con heladas. Los suelos originados en acumulaciones sedimentarias fluvio-lacustres presentan desarrollos y texturas variables (Entisoles, Solonetz) en general son neutros a ligeramente alcalinos y con drenaje insuficiente. La vegetación presenta una fisonomía dominante de parques y sabanas, muy modificada por acción humana. Se trata de un macromosaico de bosques caducifolios y semicaducifolios, palmares, pastizales de tierra firme, pajonales y esteros que por la mayor disponibilidad hídrica presenta diversidad específica.

Aspectos socioeconómicos

En territorio argentino la zona de influencia del río Bermejo comprende partes de la provincia de Salta, Jujuy, Chaco y Formosa. La actividad económica es típicamente agropecuaria y la producción industrial se

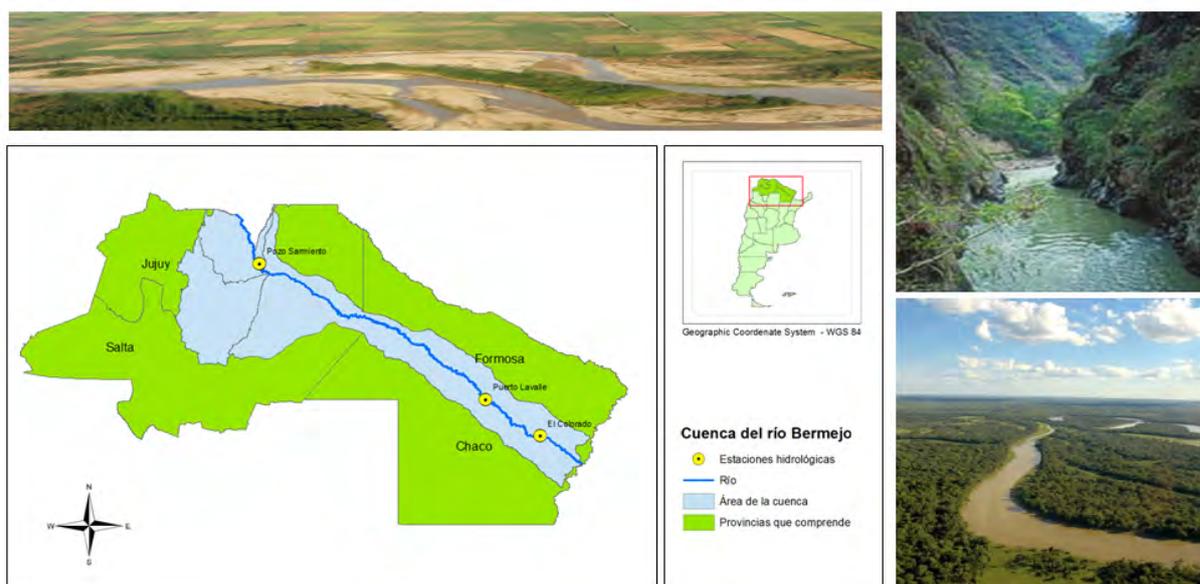


Figura 2.3: Área de estudio

relaciona principalmente con la producción primaria. El desarrollo demográfico y económico se localiza en dos grandes núcleos separados por una extensa planicie muy desierta, el primero se halla al oeste en Salta y Jujuy y el segundo en la zona aldonera de la provincia del Chaco. Existe un sistema ferroviario y vial troncal nacional en Salta y Jujuy, al este se le agrega el sistema navegable del Paraná. Estas zonas separadas por 500 km están unidas por las líneas ferroviarias de Embarcación a Formosa y de Metán a Barranqueras con una falta absoluta de vinculación directa durante el semestre lluvioso de verano. El mayor uso que se le da al Bermejo está en la zona rica aldonera al este, aunque gran parte de sus aguas se pierden en bañados y esteros o desaguando directamente en el Paraguay.

En la zona de influencia del río Bermejo se destacan los siguientes recursos naturales y económicos:

- Una valiosa zona de regadío en la parte occidental, en la provincia de Jujuy y Salta con importantes cultivos de caña de azúcar
- Una extensa zona ganadera a lo largo de todo el río y a ambos costados, con más de un millón de cabezas vacunas y lanares
- Una gran extensión de campos cubiertos de bosques naturales con vegetación tropical salteña típica que va intensificando su densidad boscosa a medida que el cauce del Bermejo avanza hacia su desembocadura.
- Una gran riqueza en los yacimientos pretrogasíferos de Salta y mineros de Jujuy
- Fuentes energéticas en las caídas de agua en la zona montañosa del oeste
- Una extraordinaria zona aldonera y potencialmente agrícola y ganadera en la parte oriental.

Crecidas Anuales Del Río Bermejo

Las crecidas anuales en la cuenca del río Bermejo se producen entre los meses de diciembre y abril debidas exclusivamente a las precipitaciones en sus nacientes y suelen generar situaciones hidrológicamente críticas, tal como sucediera en 1984, 1997, 1999, 2000 y 2008, por citar los casos que mayor impacto produjeran en la región. Las intensas lluvias, originadas en la alta cuenca, son las responsables de dichas crecidas cuyo traslado, hacia el tramo medio e inferior de la misma, ocasionan desbordes sobre ambas márgenes con los consiguientes perjuicios debidos al anegamiento de campos en producción agrícola-ganadera, corte de rutas y aislamiento de poblaciones rurales.

A continuación se presentan algunos datos hidrológicos que intentan reflejar la importancia de cada crecida anual para el año 2000 y 2008 (esta serie de datos esta disponible desde el año 1992, cuando se inició el Sistema de Información Hidrológica de la Cuenca del Río Bermejo - SIH), indicándose la altura máxima registrada en la estación Pozo Sarmiento, generalmente utilizada como referencia del comportamiento de la alta cuenca, el caudal máximo allí aforado, la altura media durante el aforo, y la permanencia, en cantidad de días consecutivos, de caudales superiores a los 2000 m³/s considerados capaces de producir situaciones de riesgo en el tramo inferior de la cuenca.

Se presentan también datos de Puerto Lavalle, localidad de la baja cuenca ubicada en un tramo crítico del río cuando su nivel supera la altura de 5,90 m en la escala del lugar. La altura máxima alcanzada allí, la fecha de ocurrencia y su permanencia en días consecutivos por encima del citado valor dan cuenta de la importancia de la crecida anual en ese sector. Se indica asimismo si se registraron desbordes en la zona.

Se presenta asimismo la altura máxima observada en El Colorado, localidad ubicada unos 120 kilómetros aguas arriba de la confluencia del Río Bermejo con el Río Paraguay ¹.

■ Crecida Anual: 2000-2001

● Pozo Sarmiento:

Altura máxima registrada: 6,25 m (29/01/2001) Caudal máximo registrado: 5921 m³/s para una altura de 6,20 m (29/01/2001) Permanencia de caudales > 2000 m³/s: 4 días

● Puerto Lavalle:

Altura máxima registrada: 5,95 m (26/02/2001) Permanencia de alturas > 5,90 m: 3 días

● El Colorado:

Altura máxima registrada: 7,70 m (28/02/2001)

No se registraron desbordes.

■ Crecida Anual 2008-2009:

● Pozo Sarmiento:

¹Los datos de esta sección fueron obtenidos del sitio oficial de la Comisión Regional del río Bermejo (<http://www.corebe.org.ar/index.php>, 2011)

Altura máxima registrada: 7,14 m (9/03/2009) Caudal máximo aforado: 3676 m³/s para una altura de 5,30 m (10/03/2009) Permanencia de caudales aforados > 2000 m³/s: 15 días

- Puerto Lavalle:

Altura máxima registrada: 6,06 m (10/01/2009) Permanencia de alturas > 5,90 m: 6 días

- El Colorado:

Altura máxima registrada: 8,15 m (11/01/2009) Permanencia de alturas > 8,00 m: 7 días

Durante los meses de Diciembre de 2008 y Marzo de 2009 se registraron los mayores caudales debido a que en toda las estaciones de la alta cuenca las precipitaciones mensuales fueron para esos meses superiores a la media mensual originando picos de importancia los días 28/12/2008 y el 10/03/2009..

Es de recordar por último que, dadas sus características, el río Bermejo modifica en cada crecida el perfil de las secciones que se emplean para efectuar mediciones en él debido a un continuo proceso de remoción y deposición de sedimentos que altera márgenes y lecho, por lo que la comparación de distintas crecidas considerando únicamente la altura que alcanzaron las aguas en un mismo sitio puede inducir a conclusiones erróneas.

2.4. Modelo desarrollado

Esta sección describe las bases técnicas del modelo desarrollado. El modelo utilizado en esta investigación esta basado en el modelo LISFLOOD-FP originalmente desarrollado por Bates y De Roo en el año 2000.

LISFLOOD-FP es un modelo hidráulico 1D/2D acoplado basado sobre una grilla raster, específicamente desarrollado para aprovechar conjuntos de datos topográficos de alta resolución (Bates & De Roo, 2000). Efectivamente, las inundaciones son tratadas usando un proceso de llenado de volumen basado en principios hidráulicos e incorporando nociones física claves de conservación de masa y conectividad hidráulica.

2.4.1. Estructura del modelo de simulación de inundación

Existen una gran cantidad de modelos hidrodinámicos que estudian las inundaciones de llanuras pertenecientes a cuencas hídricas. Estos modelos generalmente tienen centrado su interés en predecir el hidrograma del río en distintos puntos para eventos seleccionados, considerando a la llanura circundante más bien como una zona de alimentación de agua al río. De esta forma la inundación está considerada a través del desborde del río y el proceso que se simula es esencialmente el escurrimiento superficial en la llanura y en el canal propio del río (Vazquez et al., 2006).

La figura 2.4 muestra el caso de un río con un área inundada. El canal tiene una sección principal y dos laterales que representan la llanura de inundación en el margen derecho e izquierdo. El modelo desarrollado en este documento describe el cauce del río y la llanura de inundación como una serie de secciones transversales perpendiculares a la dirección del flujo. La representación del proceso en el modelo consiste en el enrutamiento del flujo en el canal principal y en la llanura de inundación, junto al modelado hidrológico del intercambio de agua entre el canal principal y la planicie. El agua de inundación se mueve más lentamente a través de la llanura

de inundación que en el canal. Una vez que la profundidad del cauce completo ha sido superado en una celda del canal, el flujo se moverá desde el canal a la planicie de inundación y un modelo de inundación es necesario (Moussa & Bocquillon, 2009).

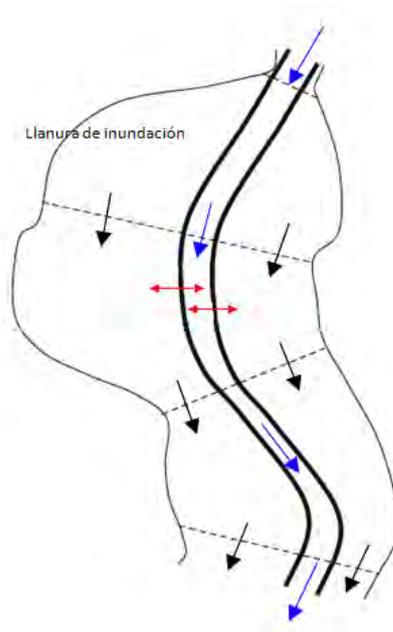


Figura 2.4: Vista del canal principal y la llanura de inundación, divididos por celdas e indicando las direcciones de flujo de intercambio. Fuente: Moussa & Bocquillon (2009)

Una inundación consiste en una onda que se propaga aguas abajo, con dos fases: la subida del hidrograma (Fig. 2.5 a-d), cuando la profundidad del cauce lleno es alcanzada, el agua deja de ser contenida en el cauce principal del río y se derrama sobre la llanuras de inundación adyacentes (margen derecho e izquierdo), y la recesión del hidrograma (Fig 2.5 d-g).

Para el flujo del canal por debajo de la profundidad de desbordamiento (Fig. 2.5 a), los procesos de flujo pueden ser representados simplemente en una dimensión (Knight & Shiono, 1996). Para el caso de flujo de desbordamiento (Fig. 2.5 b-f), esta situación es más compleja. En general, el flujo de llanura de inundación está representado por un enfoque de dos dimensiones. Debido a la complejidad de los procesos de intercambio de flujo entre el canal principal y la llanura de inundación, y la falta de datos espaciales de la zona de inundación para eventos extremos históricos, nosotros tomamos como hipótesis la representación mínima del proceso capaz de realizar simulaciones dinámicas.

Cada celda de planicie de inundación es tratada como un volumen de almacenamiento. El cambio en el volumen de la celda en el tiempo es por lo tanto, descrita por los flujos de entrada y salida durante un paso de tiempo, incluyendo los flujos de intercambio entre el canal principal y la llanura de inundación, y los flujos de intercambio entre las celdas adyacentes en la planicie de inundación (Fig. 2.4). Los modelos de elevación digital se utilizan para construir dos relaciones que caracterizan las dimensiones de una celda:

- el nivel del agua en la celda - volumen en la celda.
- el nivel de agua en la celda - área de zona inundada.

En consecuencia, el modelo permite simular la profundidad del agua en el canal principal y en la llanura de inundación, obteniendo de este modo directamente el volumen y el área de extensión inundada.

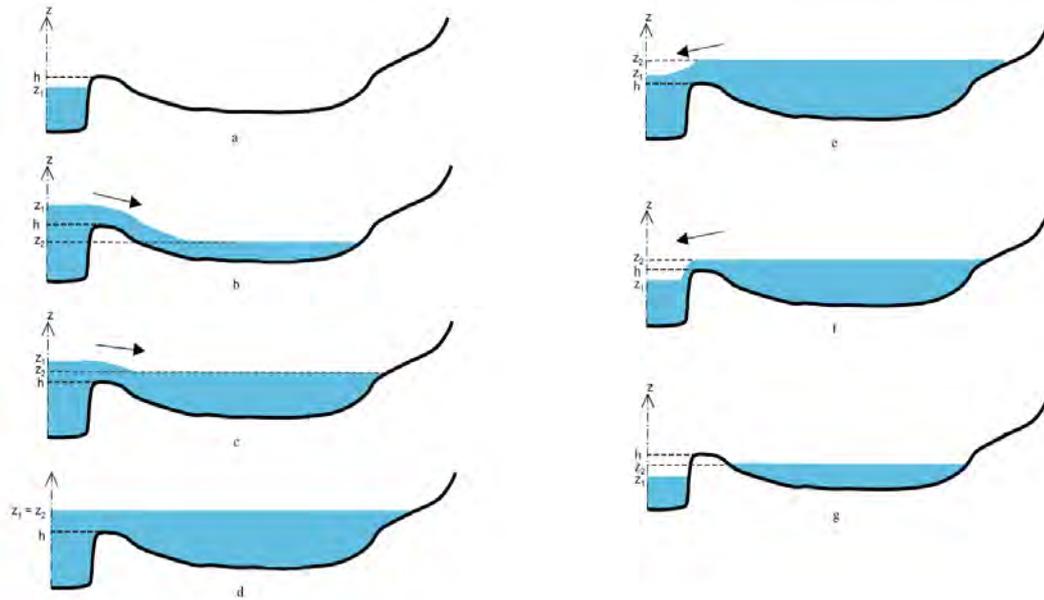


Figura 2.5: Principales procesos de flujo de desbordamiento durante la subida del hidrograma (a-c), el equilibrio (d) y la recesión del hidrograma (e-g). z_1 es la profundidad del agua en el canal principal, z_2 es la profundidad del agua en la planicie de inundación y h es la profundidad desbordamiento. Fuente: Moussa & Bocquillon (2009)

2.4.2. El canal

El flujo del canal es modelado con un enfoque cinemático unidimensional que es capaz de capturar la propagación de una onda de inundación aguas abajo y la respuesta del flujo a inclinación de la superficie libre, la cual puede ser descrita en términos de ecuaciones de continuidad y momento como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (2.1)$$

$$S_0 - \frac{n^2 Q^2 P^{4/3}}{A^{10/3}} = 0 \quad (2.2)$$

Donde Q es el caudal en el canal, A el área transversal del flujo, q el flujo que llega al canal desde otras fuentes (en nuestro caso sería desde la llanura de inundación, ya que en este trabajo sólo se modela el canal principal sin afluentes), S_0 la pendiente cuesta abajo del lecho del río, n el coeficiente de fricción de Manning, P el perímetro mojado del flujo.

Los parámetros a lo largo del vector del canal requeridos para el funcionamiento del modelo son el ancho, el coeficiente de Manning n y la elevación del lecho fluvial (cauce). Este último da la pendiente del lecho del río y la profundidad del cauce lleno (desbordamiento) cuando el vector del canal se combina con el DEM de la llanura de inundación.

En la figura 2.6 se presentan dos perfiles que ilustran los parámetros de las ecuaciones utilizadas para el modelado del canal. Las zonas coloreadas de naranja representan el área transversal del flujo, es decir el área de flujo de intercambio. Con color rojo se señala el perímetro mojado del canal y en color verde se muestra la pendiente del cauce. Además en la imagen 2.6-b puede apreciarse las diferentes longitudes de los segmentos del canal.

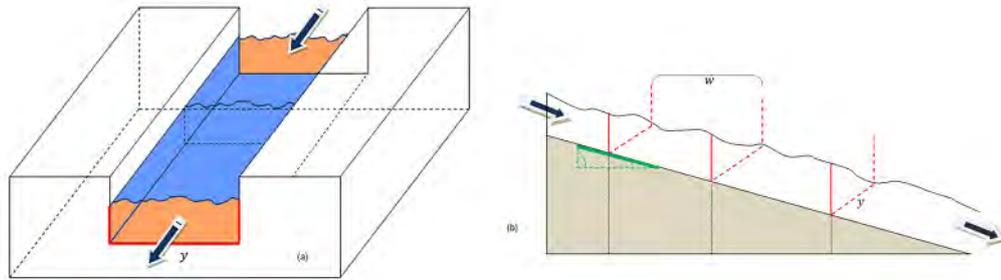


Figura 2.6: Ilustración gráfica del canal y las variable de modelado. Color rojo = perímetro mojado (P), color naranja = área de intercambio (A), color verde = pendiente (S_0)

La longitud del canal en cada punto varía dependiendo de la distancia recorrida por el río en un área. Esta distancia recorrida a su vez está vinculada con el comportamiento del río, por ejemplo en zonas donde el diseño del cauce es meandroso, el valor de la variable longitud será más grande que en lugares donde el río tienda a ser recto.

En la sección 2.5.3 se explicará en detalle como fueron obtenidas e implementadas cada una de las variables intervinientes en el modelo hidrológico.

Elección de paso de tiempo

Para una correcta elección de paso de tiempo, muchas veces se requiere de un proceso de prueba y error a fin de lograr soluciones estables. Esto no es sencillo, ya que la estabilidad depende de la profundidad de agua, los gradientes de superficie libre, el coeficiente de Manning y el tamaño de celda de la cuadrícula. Así el paso de tiempo óptimo (lo suficientemente grande para ser computacionalmente eficiente, pero lo suficientemente pequeño para asegurar la estabilidad del modelo), varía en el espacio y tiempo. El uso de pasos de tiempo demasiados grandes provoca en la solución oscilaciones tipo “tablero de ajedrez”, las cuales se extienden y amplían rápidamente haciendo inútil la simulación.

Aunque no sea intuitivo, estas oscilaciones se producen con mayor facilidad en zonas con pequeños gradientes de superficie libre. Por este motivo, es necesario establecer un limitador de caudal para evitar la inestabilidad en las zonas de aguas muy profundas, mediante el establecimiento de un caudal máximo entre las celdas (Neil M. et al., 2005).

Este límite es fijado con el fin de evitar sobrestimar o subestimar la solución, y es una función de la profundidad del flujo y el tamaño de cuadrícula de la celda:

$$dt = \frac{1}{10} \min \left| \frac{\Delta h(wy)}{Q} \right| \quad (2.3)$$

donde w es el largo del segmento del río e y su ancho.

Este valor se determina considerando el cambio en la profundidad de una celda, y la garantía de que no es lo suficientemente grande para invertir el flujo dentro o fuera de la celda en el próximo paso de tiempo. (Fig. 2.7).

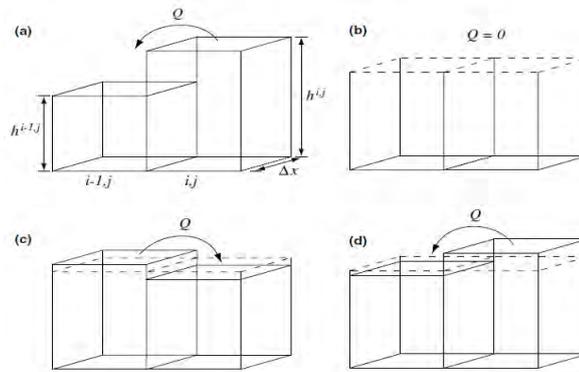


Figura 2.7: Ilustración de las oscilaciones “tablero de ajedrez” entre dos celdas adyacentes. (a) Al final del paso de tiempo t , el nivel de la celda i, j es superior al de la celda $i-1, j$. (b) Al final del paso de tiempo $t + dt$, la descarga de i, j para $i-1, j$ debe ser igual a cero ya que los niveles en cada celda son iguales. (c) Sin embargo, una oscilación comienza a desarrollarse como resultado de la baja en la superficie de gradiente entre las dos celdas y, al final del paso de tiempo $t + dt$, la descarga de i, j para $i-1, j$ hace que el nivel de $i-1, j$ pase a ser muy alto. Esto se traducirá en una inversión del flujo errónea en el paso de tiempo $t + 2dt$. (d) Al final del paso de tiempo $t + 2dt$, el nivel de $i-1, j$ ha causado una gran descarga hacia i, j , cuyo nivel se eleva demasiado y causa una segunda inversión de flujo sucesiva. Estas oscilaciones se desarrollan y extienden rápidamente causando la destrucción de la solución. Fuente: Neil M. et al. (2005)

Para el modelado del canal, se calcula el paso de tiempo considerando el máximo caudal en el tiempo inicial. Este máximo caudal varía (y a su vez modifica dt) según la magnitud de las perturbaciones que se le realizan inicialmente al río, como así también de la ubicación donde se realizan, ya que a lo largo del río varía su ancho y longitud (a diferencia de las celdas de la planicie de inundación). Este paso de tiempo es fijo en todos los pasos de ejecución.

2.4.3. Planicie

Los flujos de la planicie se describen similarmente en términos de ecuaciones de continuidad y momento, discretizada sobre una grilla de celdas cuadradas que permite al modelo representar campos de flujo dinámicos 2D sobre la llanura de inundación. Nosotros suponemos que el flujo entre dos celdas es simplemente una función de la diferencia de altura de la superficie libre entre dichas celdas (Estrela & Quintas, 1994):

$$\frac{dh^{i,j}}{dt} = \frac{Q_x^{i-1,j} - Q_x^{i,j} + Q_y^{i,j-1} - Q_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y} \quad (2.4)$$

$$Q_{x,y}^{i,j} = \frac{h_{flow}^{5/3}}{n} \frac{(h^{i-1,j} - h^{i,j})^{1/2}}{\Delta x} \Delta y \quad (2.5)$$

Donde $h^{i,j}$ es la altura de superficie de agua libre en el nodo (i, j) , Δx y Δy son las dimensiones de la celda, n es el coeficiente de rugosidad (o fricción) de Manning de la llanura de inundación, Q_x y Q_y describen la taza de flujo volumétrica entre las celdas de la planicie. La profundidad de flujo, h_{flow} , representa la profundidad

a través de la cual el agua puede fluir entre dos celdas y se define como la diferencia entre la mayor altura de superficie de agua libre en las dos celdas ($|h_{i,j}|_{max}$) y la elevación más alta del cauce del río ($|z_{i,j}|_{max}$).

La figura 2.8 muestra la relación de intercambio de flujo entre dos celdas (i, j) y expone la distribución de los vecinos que afectan el volumen de agua total de la celda central en un paso de tiempo. Esta vecindad esta conformada por un grupo de 4 celdas ubicadas en forma de cruz (arriba, abajo, izquierda, derecha).

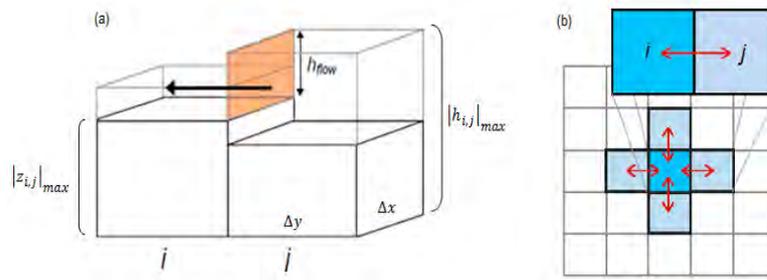


Figura 2.8: Representación gráfica de intercambio de flujo entre celdas adyacentes en la planicie. Fuente: Adaptado de Bates et al. (2005)

Si bien este enfoque no representa con exactitud la propagación de la onda difusiva en la planicie, debido a la disociación de los componentes x e y del flujo, es computacionalmente simple y se ha comprobado que da resultados muy similares a la discretización de diferencia finita de la ecuación de onda difusiva (Horritt & Bates, 2001b).

La ecuación 2.2 de cálculo de caudal puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$Q_{i,j} = \frac{A_{i,j}^{5/3} S_{i,j}^{1/2}}{P_{i,j}^{2/3} n} \quad (2.6)$$

donde

$$S_{i,j} = \frac{h_i - h_j}{\Delta x} \quad (2.7)$$

$$A_{i,j} = (\text{máx}(h_i, h_j) - \text{máx}(z_i, z_j)) \Delta x = h_{flow} \Delta x \quad (2.8)$$

$$P_{i,j} = 2h_{flow} + \Delta x \quad (2.9)$$

En la imagen 2.9 a,b puede observarse la representación gráfica de las variables mencionadas anteriormente. El área sombreada de color naranja simboliza el área de la sección transversal $A_{i,j}$, es decir la zona a través de la cual el agua puede fluir entre dos celdas. El contorno de color azul indica el perímetro mojado $P_{i,j}$ y la línea roja en la figura 2.9 b representa la pendiente entre las celdas (i, j).

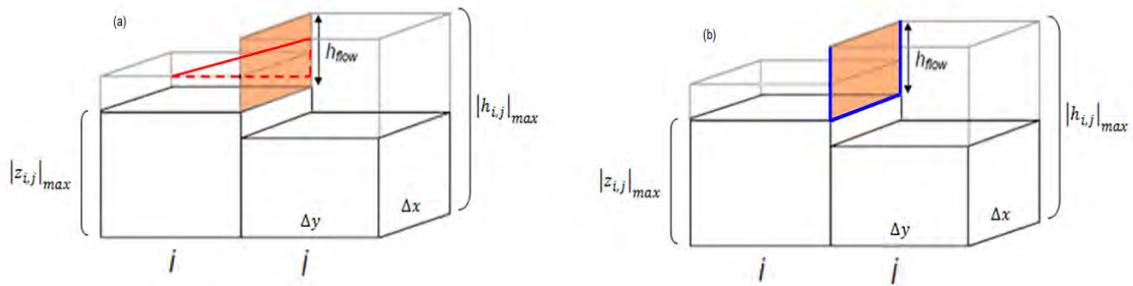


Figura 2.9: Representación gráfica de las variables de modelado. Color rojo = pendiente ($S_{i,j}$), Color naranja = área de intercambio ($A_{i,j}$), Color azul = perímetro mojado ($P_{i,j}$), h_{flow} , Δx , Δy . Fuente: Adaptado de Bates et al. (2005)

Paso de tiempo

Para el modelado de la planicie de inundación se calcula el paso de tiempo considerando el máximo intercambio de flujo entre dos celdas adyacentes en el tiempo inicial. El cálculo realizado es análogo al del río, lo único que varía son la dimensión del área. En el caso del río esta área cambia a lo largo del río debido a que cambia la longitud y/o ancho del mismo. En el caso de la planicie, el área es la misma en todas las celdas a lo largo de la planicie. Este paso de tiempo es fijo en todos los pasos de ejecución.

$$dt = \frac{1}{10} \min \left| \frac{\Delta h (\Delta x \Delta y)}{Q} \right| \quad (2.10)$$

2.4.4. Interacción planicie-canal

Cada canal es discretizado como un único vector a lo largo de su eje separado de la grilla de planicie suprayacente. El canal por lo tanto no ocupa píxeles de la llanura de inundación, pero en su lugar representa una trayectoria del flujo extra entre los píxeles que se extienden sobre el canal. Así los píxeles de la planicie de inundación que caen sobre el canal tienen dos niveles del agua asociados a ellos: uno para el canal y otro para la llanura de inundación. El canal interactúa con la planicie a través de una ecuación de flujo tipo la de Manning (como en la ecuación 2.6), permitiendo que el agua fluya entre los píxeles del canal y las celdas de planicie que se extienden sobre el canal. Este nuevo sistema (conocido como Near Channel Floodplain Storage, o NCFS, modelado por (Horritt & Bates, 2001b)) ha demostrado ser el más adecuado para situaciones donde los grandes espaciamientos en la grilla de la llanura de inundación es usada en conjunción con un canal cuyo ancho no supera la dimensión de la planicie ($ancho < \Delta x$). Dado que el esquema NCFS también calculará los flujos de la planicie entre las celdas ocupadas por el canal, el recorrido del flujo adicional en regiones cercanas al canal también será representado.

La ecuación 2.6 también se utiliza para calcular los flujos entre las celdas de la planicie y el canal, actualizando las profundidades de las celdas de la llanura mediante la ecuación 2.4 en respuesta al flujo del canal. Estos flujos se utilizan también como el término fuente en la ecuación 2.1, vinculando los flujos de canal y planicie. Así, en el modelo se representa transferencia de masa entre el canal y la llanura de inundación y esto, se supone que depende solamente de niveles relativos de agua. Si bien esto deja de lado los efectos tales como la transferencia

de momento canal-planicie y los efectos de advección y difusión secundaria sobre la transferencia de masa, es el método más sencillo para el problema de acoplamiento y debe reproducir el comportamiento dominante del sistema real. La figura 2.10 muestra la representación gráfica de las variables ajustadas al intercambio de flujo entre la planicie y el río.

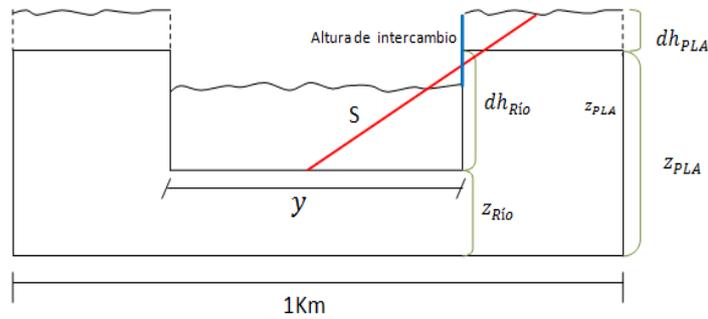


Figura 2.10: Representación gráfica de flujo de intercambio entre la planicie y el río

Sea y el ancho del río en una celda, podemos reescribir las variables pendiente, área de intercambio y perímetro mojado de la siguiente manera:

$$S_{i,j} = \frac{(z_{PLA} + dh_{PLA}) - (z_{Río} + dh_{Río})}{\frac{\Delta x + y}{4}} \quad (2.11)$$

$$A_{i,j} = (\text{máx}(z_{PLA} + dh_{PLA}, z_{Río} + dh_{Río})) - \text{máx}(z_{PLA}, z_{Río})y \quad (2.12)$$

$$P_{i,j} = 2A_{i,j} + y \quad (2.13)$$

Paso de tiempo

En primer lugar se calculó el paso de tiempo inicial de la planicie, ajustándolo al tiempo de muestreo (por ejemplo: 1h o 1 día) este ajuste se realizó para obtener un número entero de pasos de tiempo. Debido a que el paso del tiempo de la planicie es por lo general mucho mayor al paso del tiempo del canal se calculó, en segundo lugar, el paso de tiempo inicial del río, ajustándolo al paso de tiempo de la planicie (para obtener un número entero de pasos de tiempo sobre el río).

Por lo tanto tenemos los dos pasos de tiempos anidados, es decir para cada paso de tiempo sobre la planicie, se ejecutan uno o más pasos de tiempos sobre el canal. Finalmente para cada iteración de tiempo realizada sobre la planicie, se recalcula el paso de tiempo del río.

De este modo obtenemos un paso de tiempo dinámico para el río, debido a que su caudal varía durante la ejecución. Por otro lado el paso de tiempo sobre la planicie es fijo durante todo el tiempo de ejecución.

2.5. Implementación

En esta sección se explicarán los pasos que fueron llevados a cabo para obtener las capas de entrada del modelo hidrológico, es decir, un vector que represente el río con todas sus variables y una matriz que represente el modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) de nuestra área de estudio. Además se expondrán todos los procesos previos relevantes que deben ser realizados antes de la ejecución final del modelo.

Para procesar el DEM, digitalizar el río y visualizar los datos se uso el software ENVI y ArcGIS. La familia de productos ENVI proporciona una variedad de soluciones de software para el procesamiento y análisis de imágenes geospaciales utilizados por científicos, investigadores, analistas de imágenes y profesionales de SIG en todo el mundo. Las soluciones de ENVI combinan la última tecnología de procesamiento de imágenes espectrales y la tecnología de análisis de imágenes con una interfaz intuitiva y fácil de usar para obtener información significativa a partir de imágenes.

Profesionales de diversos sectores y disciplinas, como la defensa y la inteligencia, la planificación urbana, la minería, geología y ciencias del espacio y la tierra utilizan ENVI para obtener respuestas rápidas y precisas para ayudarles a tomar decisiones. Todas las soluciones de ENVI están construidas sobre IDL (Interactive Data Language), un potente lenguaje de programación estructurado que permite caracterizar y personalizar fácilmente las funcionalidades para satisfacer necesidades propias. En este proyecto se usó IDL para la obtención, manipulación de datos e implementación del modelo. IDL es un lenguaje de programación científico utilizado en muchas disciplinas para crear, operar y visualizar datos numéricos complejos. IDL provee un entorno informático que permite implementar desde pequeños programas de análisis hasta aplicaciones ampliamente complejas.

2.5.1. Modelo de Elevación Digital

La figura 2.11 muestra el modelo de elevación digital sobre el cual se llevó a cabo el análisis hidrológico. El DEM se obtuvo del sitio de “HYDROlogical data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales” (<http://hydrosheds.cr.usgs.gov/>, 2011) y consiste en un conjunto de datos cuya resolución espacial es de 90m. Los DEM's del STRM disponibles están condicionados para uso hidrológico ya que tienen bien remarcados los cursos de agua, delimitadas las lagunas, etc. Nuestro DEM de trabajo cubre un área de aproximadamente 220 mil km².

La principal modificación que se realizó sobre el DEM fue disminuir la resolución espacial, es decir aumentar su tamaño del pixel. Se tomó esta decisión por tres motivos, la primera fue que implementamos el modelo hidrológico con el objetivo de alertar posibles inundaciones, por lo tanto un fuerte requerimiento es obtener resultados a tiempo, es decir que la ejecución del modelo debe demorarse un tiempo razonable. Para poder minimizar el tiempo de ejecución debemos reducir el número de cálculos computacionales, lo que es equivalente a reducir el número de celdas a operar. En la sección 2.6.2 se presentan algunos valores de tiempo de ejecución para distintos casos de prueba. La segunda razón es que el modelo sobre el cual nos basamos ha demostrado trabajar eficientemente con planicies de inundación amplias y ríos angostos (subsección 2.4.4), por este motivo es una condición necesaria que el río este incluido en el píxel de la planicie. Si redujéramos esta dimensión, sólo podríamos representar ríos muy angostos (menor a 90m) lo cual no se ajustaría a la realidad del río Bermejo.

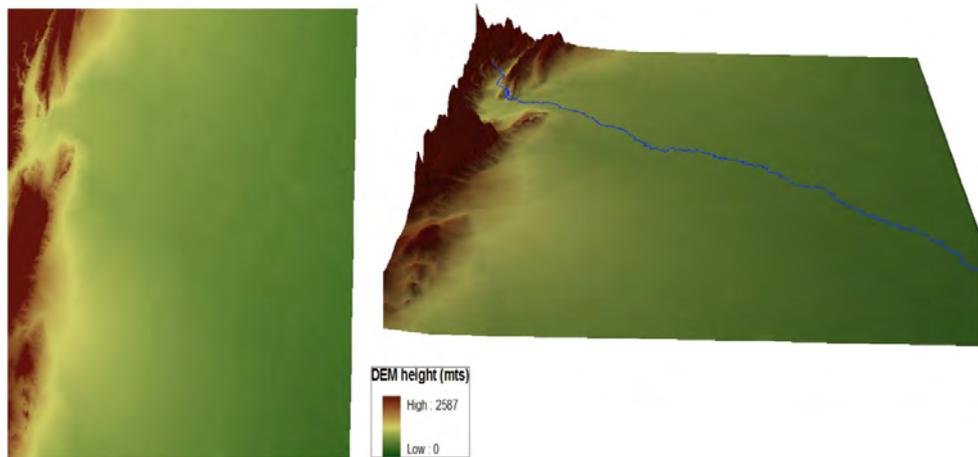


Figura 2.11: DEM del área de estudio

Por otro lado, debemos recordar que la idea de realizar esta aplicación hidrológica fue detectar áreas críticas frente a una situación de emergencia y planificar adquisición de imágenes satelitales en la zona (por ejemplo SAR de aprox. 20 km). Si trabajáramos con una extensión muy chica, el problema de planificación carecería de sentido.

Por lo tanto, realizamos un remuestreo para llevar el pixel de 90m a un 1km. El valor de altura de estos nuevos pixeles fue calculada como la media de todos los pixeles de 90m incluidos en el pixel más grande. La imagen 2.12 muestra un ejemplo de la metodología de remuestreo del DEM. Se expone sólo a modo de ejemplo, no es estrictamente real, debido a que un área de 1km^2 abarca aproximadamente 11 pixeles de 90m y no 5, como muestra el gráfico. Por último la imagen fue proyectada en el sistema UTM, zona 20 sur con elipsoide WGS84.

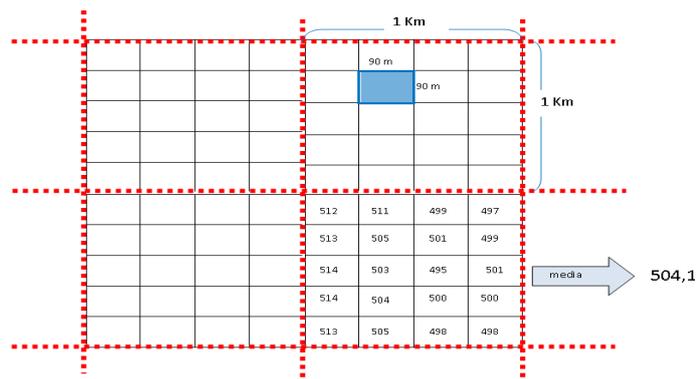


Figura 2.12: Ejemplo de metodología de remuestreo del DEM.

De la imagen resultante se identificaron los pixeles pertenecientes a la planicie que eran atravesados por el río y se extrajo su altura. La imagen 2.13 muestra los datos de altura original (color negro) y los datos obtenidos por medio de un ajuste de cuadrados mínimos (color azul - variable z_{DEM}). Este último conjunto de datos es utilizado luego, en el modelado de intercambio de flujo entre la planicie y el río.

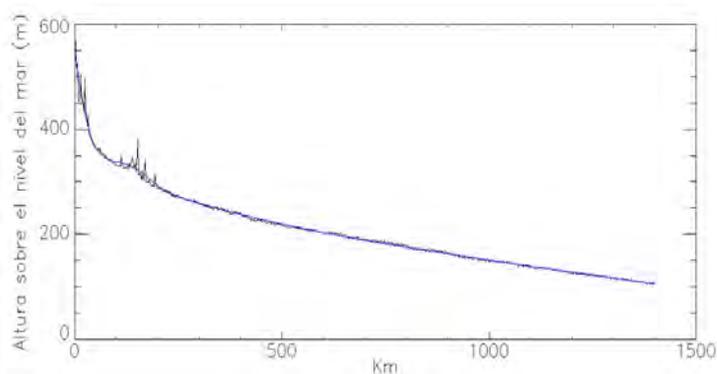


Figura 2.13: Altura original (color negro) vs. altura ajustada (color azul) de la planicie atravesada por el río.

En conclusión para la implementación de la planicie las variables de modelado son $\Delta x = \Delta y = 1km$, $z_i = a$ la altura del DEM de la celda i después del proceso de remuestreo y el coeficiente de Manning (n) igual a 0.035, el cual representa la característica de un terreno natural con poca vegetación (hierba y prados).

2.5.2. Identificación del río

Para digitalizar el río, es decir para identificar los pixeles pertenecientes al río se usó una herramienta hidrológica. Las herramientas hidrológicas “Spatial Analyst” (ArcGIS) proporcionan métodos para describir los componentes físicos de una superficie. Sus funciones de modelado permiten identificar los sumideros, determinar la dirección del flujo, calcular la acumulación de flujo, delimitar las cuencas hidrográficas, y crear redes de flujo.

Para delinear las cuencas hidrográficas o definir redes de flujo se debe avanzar en una serie de pasos. Algunos pasos son obligatorios, mientras que otros son opcionales dependiendo de las características de los datos de entrada. El flujo a través de una superficie siempre será en la dirección más empinada hacia abajo. Una vez que la dirección del flujo de salida de cada celda se conoce, es posible determinar cuáles y cuántas celdas fluyen hacia una celda dada. Esta información puede ser utilizada para definir los límites de las cuencas y las redes de flujo. El diagrama presentado en la figura 2.14 muestra el proceso de extracción de información hidrológica a partir de un modelo de elevación digital. Independientemente de lo que desee obtener, siempre se parte de un DEM.

El modelo de elevación se utiliza para determinar la dirección del flujo de cada celda. Sin embargo, si hay errores en el modelo de elevación puede haber algunas elevaciones de celdas que son inferiores a las elevaciones de las celdas circundantes. Si este es el caso, toda el agua que caiga dentro de esta celda no saldrá. Estas depresiones son llamadas sumideros. Las funciones de análisis hidrológico le permiten identificar los sumideros y ofrece herramientas para rellenarlos. El resultado es un modelo de elevación sin depresiones.

Para definir las redes de flujo, no sólo es necesario conocer la dirección de flujo del agua de celda a celda, sino que también es importante saber la cantidad de agua que fluye hacia una celda, o el número de flujo de celdas en otra celda. Cuando una cantidad suficiente de agua fluye a través de una celda, se considera que por esa ubicación pasa un río o afluente.

A continuación revisaremos los pasos implicados en el cálculo de la red de flujo a partir de nuestro DEM,

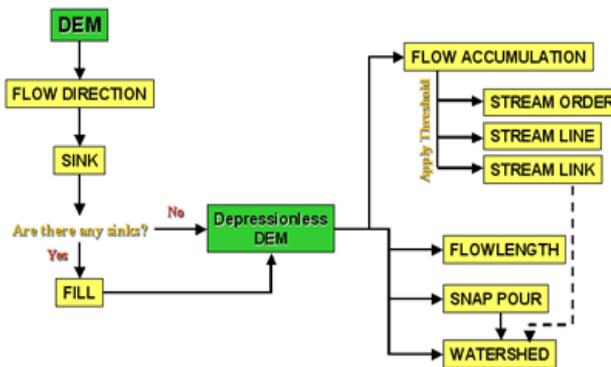


Figura 2.14: Diagrama de flujo para extraer información hidrológica desde ArcGIS. Fuente: ESRI (2008)

realizados con ArcGIS

1. **Llenado de depresiones:** Un DEM libre de sumideros es la entrada deseada en el proceso de dirección del flujo. La presencia de depresiones puede resultar en un raster de dirección de flujo errónea. En algunos casos, pueden ser sumideros legítimos en los datos. Es importante comprender la morfología de la zona lo suficientemente bien para saber cuales rasgos puede ser realmente depresiones en la superficie de la tierra y cuales son meramente errores en los datos.

Para rellenar los sumideros en un raster de superficie es necesario eliminar pequeñas imperfecciones en los datos. La función de relleno requiere una superficie de entrada, un umbral de llenado, y un raster de salida. Cuando un sumidero se llena, éste se llena al mismo nivel que su punto de derrame, la mínima elevación a lo largo de la frontera de su cuenca.

La identificación y remoción de los sumideros es un proceso iterativo. Cuando una depresión se llena, los límites de la zona rellenada puede crear nuevos sumideros, los cuales luego deben llenarse.

2. **Determinando la dirección de flujo:** Crea un raster con la dirección de flujo desde cada celda a su vecino con pendiente hacia abajo más empinada. Esta función toma una superficie como entrada y genera un raster que muestra la dirección del flujo de salida de cada celda.

Una de las claves para derivar las características hidrológicas de una superficie es la capacidad de determinar la dirección de flujo de cada celda en la grilla. Hay ocho direcciones de salida válida en relación con las ocho celdas adyacentes en las que el flujo puede dirigirse. Este enfoque se conoce comúnmente como un modelo de flujo de 8 direcciones (D8) y sigue un enfoque presentado en [Jenson & Domingue \(1988\)](#). Cada celda está representada por un valor según la matriz de codificación que se muestra en la figura 2.15-a.

La dirección del flujo se determina mediante la búsqueda de la dirección hacia abajo con máxima pendiente de cada celda. Se calcula como:

$$\text{maximum_drop} = \text{change_in_z} - \text{value}/\text{distance}$$

La distancia se determina entre los centros de las celdas. Por lo tanto, si el tamaño de la celda es uno, la distancia entre dos celdas ortogonales es 1 y la distancia entre dos celdas diagonales es 1.414216 (aproximi-

madamente la raíz cuadrada de dos). Si el descenso máximo de varias celdas es el mismo, la vecindad se amplía hasta que se encuentra el descenso más pronunciado.

Cuando una dirección de máxima pendiente se encuentra, la celda de salida es codificada con el valor que representa dicha dirección. Si todos los vecinos son más altos que la celda procesada, significa que ésta es un sumidero y por lo tanto tiene una dirección de flujo indefinida.

La figura 2.15-a muestra la codificación utilizada por la herramienta para obtener la dirección de flujo de una celda. Dicha matriz de codificación es un tipo de codificación válida especificada por ArcGIS, el objetivo es identificar y diferenciar las 8 direcciones posibles adyacentes hacia las cuales la celda central puede fluir. En este caso se utilizó una codificación de 2^n con $n = \{0, 1, 2, \dots, 7\}$, comenzando por la celda adyacente de la derecha (es decir, en una dirección de 0°) y continuando en sentido horario. La imagen 2.15-b muestra el resultado generado sobre el área de estudio, una grilla que indica la dirección de flujo de cada celda según la matriz de codificación.

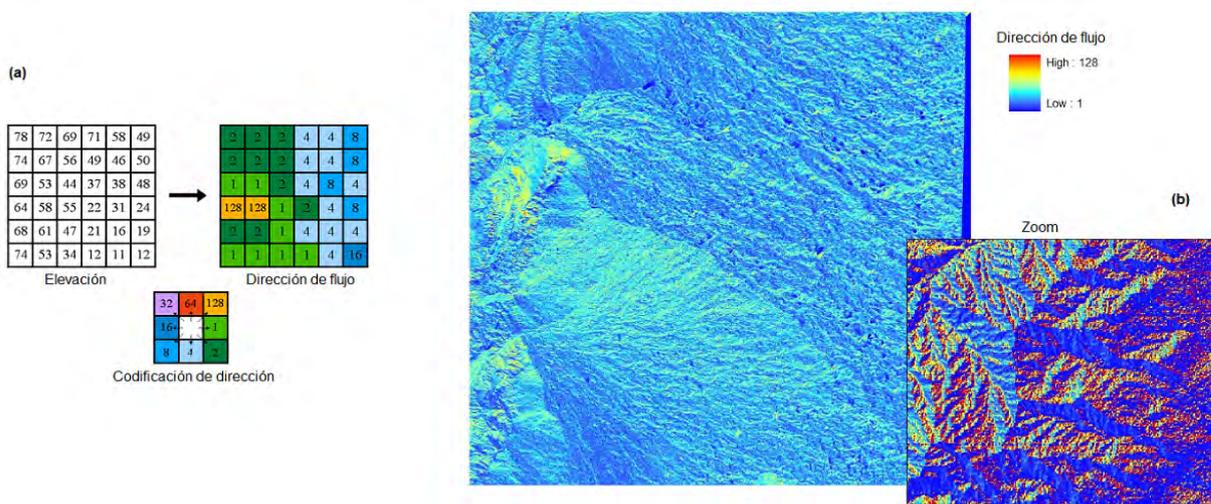


Figura 2.15: (a)Codificación utilizada para calcular la dirección de flujo. (b) Imagen de dirección de flujo sobre nuestro DEM

3. Cálculo de acumulación de flujo: la función “Flow Accumation” calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen hacia cada celda cuesta abajo. Si no se proporciona un raster de peso, se aplica un peso igual a uno a cada celda, y el valor de las celdas en el raster de salida será el número de celdas que fluyen hacia cada celda. El raster de dirección de flujo se utiliza como entrada a esta función. La figura 2.16-a, muestra la codificación utilizada por la herramienta, donde la matriz superior izquierda expone la dirección de recorrido de cada celda (es decir la dirección de flujo obtenida en el paso anterior) y la imagen superior derecha muestra el número de celdas que fluyen hacia cada celda. En la figura 2.16-b puede verse el resultado obtenido para nuestro caso. Las dos pequeñas imágenes ubicadas del lado derecho del raster global muestran como coinciden las depresiones del DEM con la acumulación de flujo, es decir con el río.

Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser utilizadas

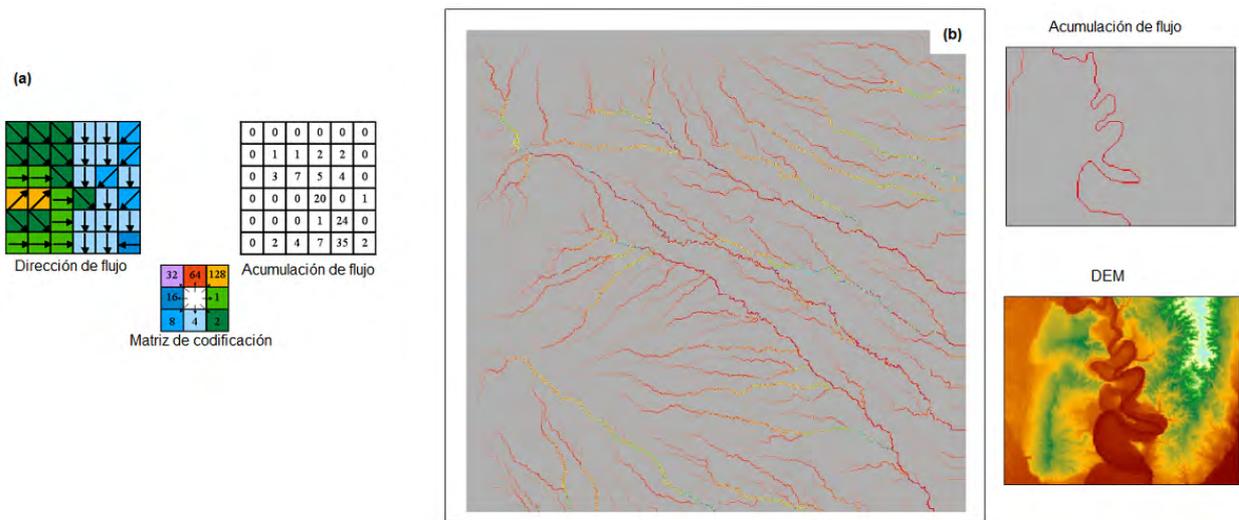


Figura 2.16: (a) Codificación utilizada para calcular la acumulación de flujo. (b) Imagen resultante de acumulación de flujo sobre nuestro DEM

para identificar los canales de flujo. Las celdas con una acumulación de flujo de cero son áreas de altos topográficos locales y puede ser utilizado para identificar las crestas.

La salida de la función de acumulación de flujo representaría la cantidad de lluvia que desembocaría en cada celda, asumiendo que toda la lluvia se convirtió en escurrimiento y no hay otros procesos de infiltración o evapotranspiración.

- 4. Identificación de ríos y arroyos:** mediante la aplicación de un valor de umbral a los datos de acumulación de flujo puede ser delineada una red de arroyos. La determinación de un umbral que represente un río permanente o donde el curso de agua comienza se ve afectada no sólo por el área que le contribuye, sino también por el clima, la pendiente y las características del suelo (Tarboton et al., 1991). Una vez creada la red puede ser caracterizada utilizando otras funciones, tales como *Stream Order*, *Stream Link*, y *Stream to Feature* de ArcGIS para asignarle órdenes o identificadores únicos a los arroyos. A través de este proceso se identificó finalmente de la red, el río Bermejo.

Por último se usaron funciones de ENVI para realizar clasificaciones, mascarar e identificar regiones de interés. La imagen 2.17 muestra el resultado obtenido. Este vector fue utilizado a lo largo del trabajo.

El motivo por el cual se usó el método descriptivo precedentemente para digitalización del río, fue debido a que inicialmente se probó con un método directo, el cual consistió en utilizar un vector de hidrografía Argentina, para identificar y extraer el río Bermejo, pero que finalmente no funcionó. Esta prueba no fue exitosa ya que (aún proyectando ambas capas al mismo sistema de coordenadas) al solapar las dos capas se observó que el río no se ajustaba, es decir no coincidía (por los constantes cambios del río), con los píxeles de menor altura (oscuros) sobre el DEM. En la figura 2.18, se muestra en color azul la no coincidencia del vector río con el DEM y en color rojo se expone el río obtenido con la herramienta de ArcGIS.

Como este método no dio el resultado esperado, se intentó identificar los píxeles del río a través de una

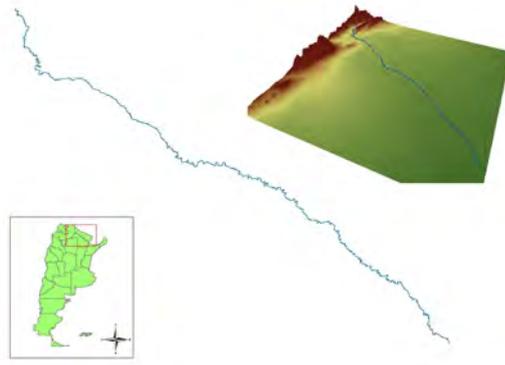


Figura 2.17: Río digitalizado

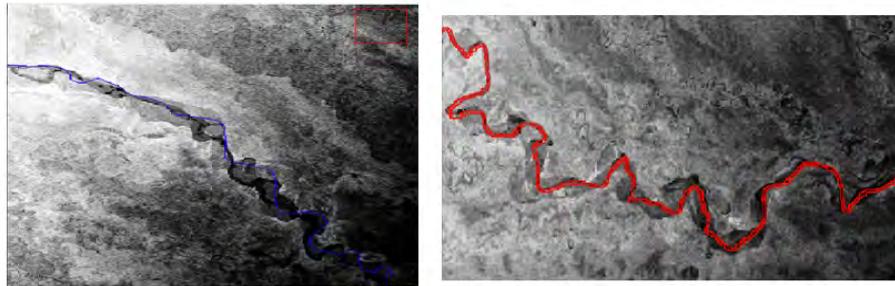


Figura 2.18: Fragmentos de comparación realizada entre el vector río y el DEM para distintos procesos de identificación del río.

clasificación utilizando umbrales de corte. Esto no fue posible hacerlo ya que el río Bermejo es un río de llanura, por lo tanto no existe diferencia relevante entre los píxeles pertenecientes al río y la planicie de inundación.

2.5.3. Modelado del río (obtención de sus parámetros principales)

En esta subsección se explicarán los procesos llevados a cabo para obtener los parámetros utilizados en el modelado del río. Es decir la altura del lecho del río, la longitud del río en un pixel, la pendiente cuesta abajo y el ancho del cauce.

- **Altura del lecho del río sobre el nivel del mar:**

La altura del lecho del río sobre el nivel del mar fue obtenido a partir del DEM. Dentro del pixel de 1km x 1km obtuvimos el mínimo de las alturas del DEM de aquellos pixeles de 90m que eran atravesados por el río. La imagen 2.19 junto con la ecuación 2.14 muestran lo mencionado anteriormente para una celda i, j . La variable $Z_{Rio_{i,j}}$ representará entonces la altura del lecho del río en el pixel i, j , el cual dependerá de las alturas de las celdas de 90m coloreadas.

$$Z_{Rio_{i,j}} = \min(Z_{1,1}, Z_{1,2}, Z_{2,2}, Z_{2,3}, Z_{3,3}, Z_{3,4}, Z_{4,4}, Z_{4,5}) \quad (2.14)$$

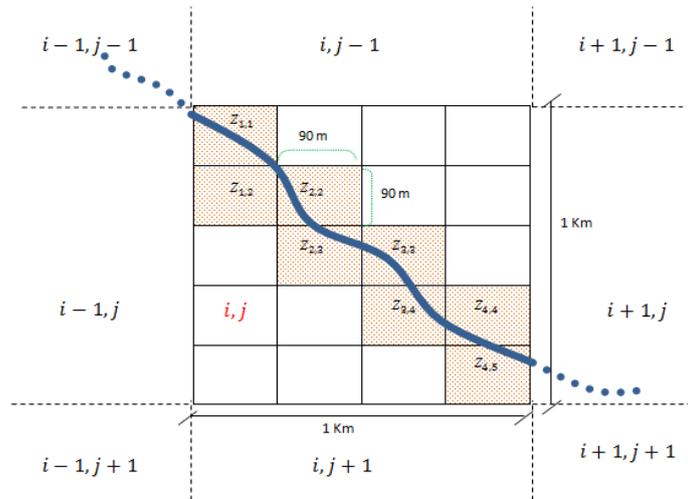


Figura 2.19: Representación gráfica del cálculo de la altura del lecho del río de la celda (i, j) .

Aplicando esto para toda la imagen raster, obtuvimos la altura del río en los pixeles donde había río y cero en donde no había. Esto nos permitió luego pasar de una imagen 2D a un vector 1D para representar el río. La figura 2.20 muestra el resultado original obtenido de la altura del lecho del río. Puede observarse que la tendencia es correcta ya que la altura del río tiende a disminuir desde su nacimiento hasta su desembocadura.

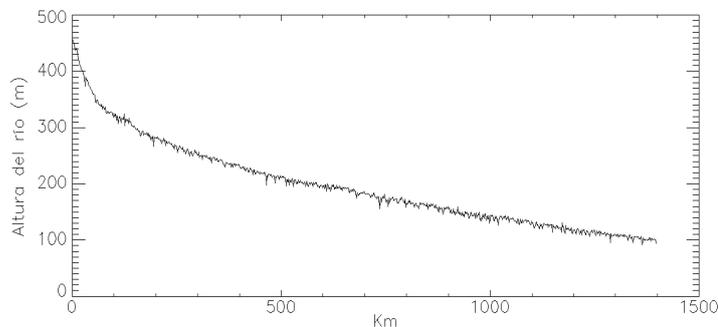


Figura 2.20: Altura original del lecho del río a lo largo de su recorrido. Valor mínimo=92.0000m, valor máximo=460.000m

Como se mencionó en la subsección 2.4.2 es necesario que la pendiente cuesta abajo sea negativa en todas sus partes, por lo tanto no es posible que la altura del pixel $i + 1$ sea mayor a la altura del pixel i . Para garantizar la condición $zRio_{i+1} < zRio_i \forall i \in rio$ se realizó un ajuste por cuadrados mínimos. Se dividió los datos originales en tres grupos y se aplicó una aproximación cuadrática a cada uno, lo que nos permitió mantener la tendencia original y eliminar los saltos. En la figura 2.21 se puede ver (en color rojo) los datos obtenidos a partir del ajuste contrapuestos a los datos originales.

Por último se muestra (figura 2.22) la relación entre la variable $zRio$ ajustada (color rojo) y la variable $zDem$ ajustada (color azul). Como era de esperar la altura de los pixeles de la planicie que son atravesados por el río es superior a la altura del lecho del río.

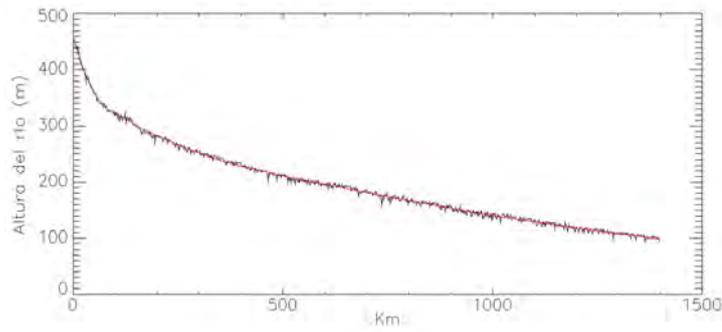


Figura 2.21: Altura original del río (negro) vs. altura obtenida por aproximación de cuadrados mínimos (rojo). Valor mínimo=99.1496m, valor máximo=458.956m

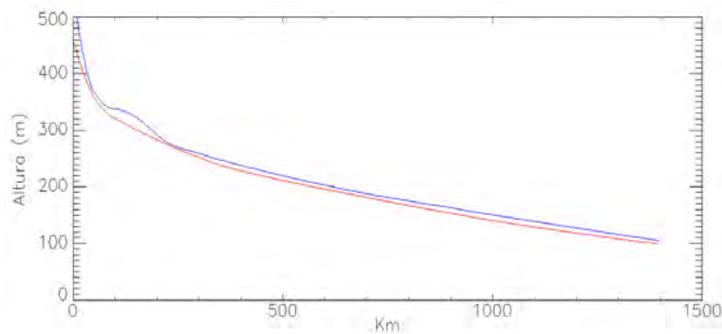


Figura 2.22: Altura de los píxeles de la planicie atravesados por el río (color azul) vs. altura del lecho del río (color rojo)

■ **Longitud del canal:**

La longitud del canal varía en cada píxel dependiendo de la distancia que recorra el río dentro de un área de un 1km x 1km. Supongamos que tenemos las siguientes dos situaciones (Figura 2.23):

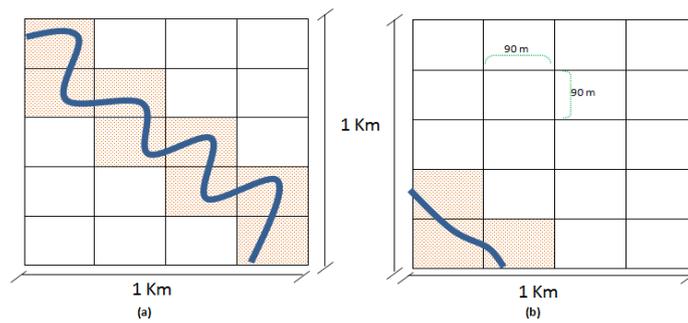


Figura 2.23: Representación gráfica de diferentes longitudes del canal en un píxel de 1km².

Esta claro que la distancia recorrida por el río dentro del píxel de 1km x 1Km en el gráfico de la izquierda es mucho más grande que la distancia en el esquema de la derecha. Si bien no es necesario en el modelado del río que la longitud de cada segmento sea variada, consideramos importante hacerlo ajustando el modelo al comportamiento real del río y respetando, de este modo, sus variaciones a lo largo de su recorrido.

Para esto se hizo una aproximación contabilizando las celdas de 90m que eran atravesadas por el río dentro del píxel de 1km (8 celdas en el caso (a) y 3 celdas en el caso (b)). Esta es una simulación de la realidad, ya que el río no intersecta de igual modo todos los píxeles de la planicie que atraviesa. Por ejemplo si se observa la figura 2.23-b se puede ver que la longitud del río en la celda (2,5) - (columna, fila) es pequeña con respecto a la distancia recorrida por el río en la celda (1,1) de la figura 2.23-a.

Por último una vez calculada la longitud de cada segmento del río, se aplicó una media móvil para suavizar el resultado y obtener valores más generales. La figura 2.24 expone la solución obtenida.

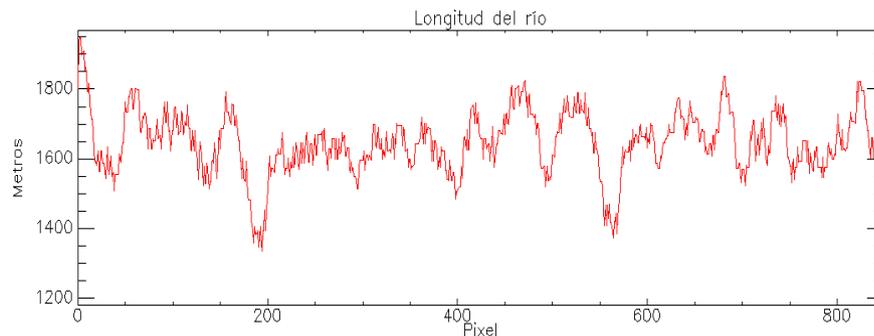


Figura 2.24: Representación gráfica de la longitud del río por píxel

■ **Pendiente del canal:**

La altura del lecho del río sobre el nivel del mar fue extraído desde el DEM y a partir de este dato y de la longitud, se obtuvo la pendiente del cauce. Es necesario que la pendiente cuesta abajo sea negativa en todas sus partes cuando se trabaja con una aproximación cinemática 1D del canal. Esta condición fue controlada en detalle.

La pendiente en el río fue calculada en todas las paredes de intercambio, a partir de la altura y la longitud del río del siguiente modo:

$$S_i = \frac{zRio_i - zRio_{i-1}}{w_i} \tag{2.15}$$

donde w_i es el ancho del río en la pared de intercambio, es decir el borde entre las celdas $i - 1$ e i .

La imagen 2.25 muestra el resultado obtenido donde se puede observar que $S_i < 0 \forall i \in [0, 1500]$. Los valores más chicos expresan mayor pendiente, lo que corresponde a que en la zona montañosa en la naciente del río hay mayor pendiente; luego comienza a disminuir a lo largo de su recorrido a medida que el río desemboca sobre la llanura. El pico alrededor de los 85 km que se observa en la figura 2.25, muestra un aumento en la pendiente con respecto a sus celdas vecinas. Esta situación se corresponde al escenario geográfico expuesto en la figura 2.26 donde el río luego de atravesar un pequeño valle se encajona nuevamente entre dos pequeñas sierras.

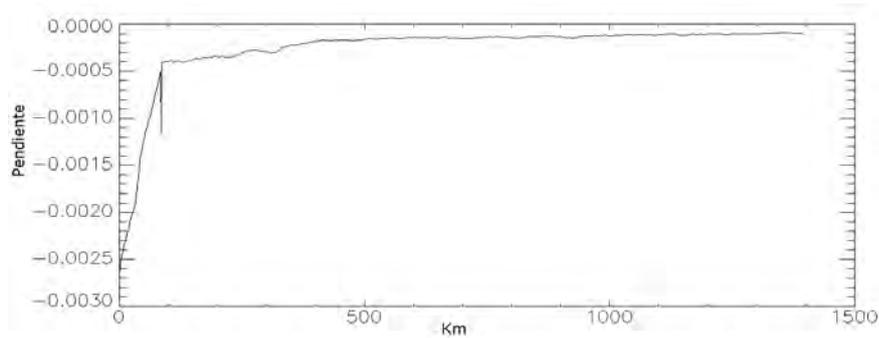


Figura 2.25: Pendiente del río. $S_i < 0$. Valor mínimo=-8.44690e-005, valor máximo=-0.00269659

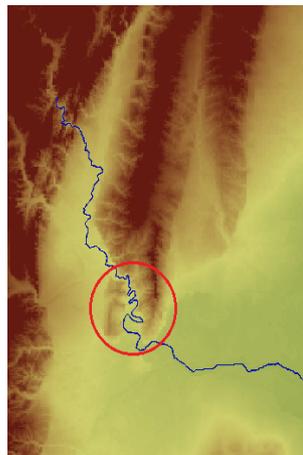


Figura 2.26: Ubicación geográfica del encajonamiento del río, este escenario implica un aumento en la pendiente del río

■ **Ancho del canal:**

Para obtener las condiciones iniciales del río (estado de equilibrio) se estableció una profundidad de 3m a lo largo de su recorrido, un caudal uniforme igual a $400 \text{ m}^3/\text{s}$ y un coeficiente de manning igual a 0.06 (que es lo adecuado para ríos con fondo muy irregular y vegetación - http://es.wikipedia.org/wiki/Formula_de_Manning (2011)). Estos valores fueron seleccionados específicamente para la zona de estudio, luego de hacer un análisis de los valores propios del río Bermejo. Como se explicó en la sección 2.4.2 se consideró el río Bermejo sin afluentes, por lo tanto una vez establecidos estos parámetros, se despejó directamente de la ecuación 2.2 el ancho del cauce del río.

Si bien la profundidad, el coeficiente de rugosidad y el caudal son uniformes, el ancho del río depende también de la variable pendiente, por esta motivo el ancho del río varía a lo largo de su recorrido. El resultado obtenido es expuesto en la imagen 2.27, donde se observa como el comportamiento del ancho del río esta influenciada por la pendiente, a medida que la pendiente disminuye, el ancho del río aumenta. Debido a esta alta correlación entre las variables (ancho y pendiente), en el gráfico también se puede ver el pico mencionado anteriormente (alrededor de los 85 km), lo que indica una disminución en el ancho del río, causado por el encajonamiento del mismo.

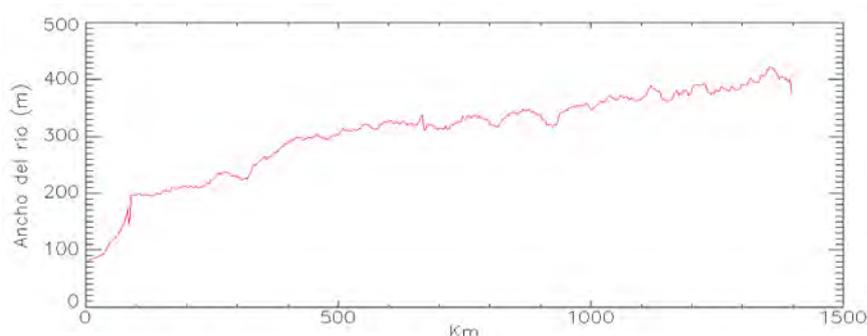


Figura 2.27: Ancho del río a lo largo de su recorrido. Valor mínimo=77.8228m , valor máximo= 422.277m

2.6. Evaluación y resultados

En esta sección se presentarán los diferentes casos de prueba realizados y los resultados obtenidos. En primer lugar se hicieron experimentos sobre el río y la planicie aislados y luego se integraron para realizar pruebas sobre el modelo completo. El objetivo principal de esta sección es analizar el comportamiento y la estabilidad numérica del modelo implementado y la conservación de agua.

Conservación de agua, se refiere a mantener el volumen total de agua sobre todo el dominio a lo largo de los pasos de ejecución. Inicialmente el modelo se encuentra en un estado de equilibrio configurado con los valores indicados en la sección 2.5.3, luego el volumen total de agua agregada (las perturbaciones) debe ser el mismo al finalizar la ejecución. Por ejemplo un frente de onda que se desplaza a lo largo del río, puede cambiar su morfología pero no el volumen de agua total.

2.6.1. Pruebas realizadas sobre el río aislado

La metodología que se utilizó para realizar las pruebas en el canal (sin interacción con la planicie) fue aumentar el nivel de altura hidrométrica en distintos puntos del cauce. Se agregó (utilizando una función Gaussiana) 2m y 7m de agua (que sumados a los 3m uniformes del canal hacen un total de 5m y 10m de agua) en cuatro puntos a lo largo del recorrido del río. La figura 2.28 muestra la ubicación de los puntos, donde fueron realizadas las pruebas y sus correspondientes valores de pendiente. La elección de estos 4 puntos se basó en la diversidad de valores entre ellos, debido principalmente a su ubicación geográfica y su posible implicancia en los resultados de las pruebas realizadas.

La intención de experimentar con estos dos niveles de agua (figura 2.28) en distintas zonas es poder mostrar como varía el frente de onda dependiendo de la pendiente cuesta abajo.

Las evaluaciones sobre el río, fueron ejecutadas simulando dos intervalos de tiempo:

- 1 día: salida muestreada cada una hora
- 10 días: salida muestreada cada un día

Para cada prueba se obtuvieron varios resultados. A continuación se expondrán y analizarán algunas figuras y gráficos. Al final de la subsección se presentará una tabla general con datos numéricos resumiendo la información

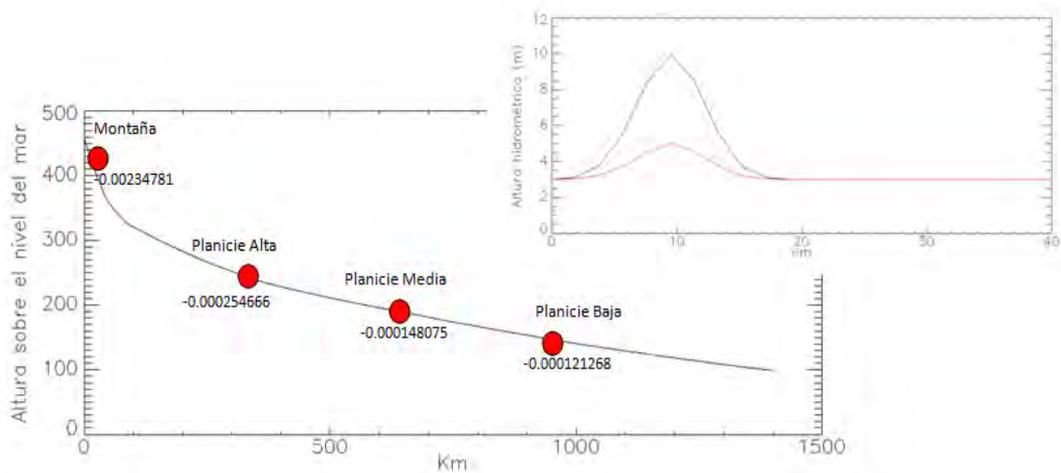


Figura 2.28: Puntos (y sus valores de pendiente) donde se realizaron las pruebas del río. Perturbaciones de 7m (color negro) y 2m (color rojo)

resultante. Comenzaremos con un tiempo de simulación igual a un día, donde la salida fue almacenada cada hora para luego aumentar el intervalo a 10 días (almacenando la salida cada un día). Dentro de los datos obtenidos, se puede observar como varía el frente de onda para cada caso, como así también la distancia recorrida dependiendo de la ubicación del punto inicial y de la cantidad de agua agregada.

2.6.1.1. Prueba 1: Montaña

Se realizaron perturbaciones de 5m y 10m, variando su ubicación inicial. El tiempo de ejecución para las tres primeras pruebas fue de 1 día.

La figura 2.29 muestra el corrimiento de la onda para una perturbación de 5m y 10m ubicada en zona montañosa. Las referencias (a) y (b) de la figura corresponde a una altura hidrométrica de 5m, donde la figura 2.29-b gráfica sólo las dos primeras horas y las dos últimas horas del día, lo que nos permite visualizar más claramente como el pico máximo de la onda se traslada en el espacio conforme pasan las horas. Este valor máximo disminuye en el tiempo (luego del transitorio inicial) a medida que la onda se ensancha, convergiendo al estado de equilibrio (3m).

Puede notarse que el segundo pico en las imágenes tiene una altura mayor al primero, se analizó este caso y no se lo pudo asociar a algún principio físico relacionado al comportamiento anormal de las variables de modelado, como el ancho del cauce o la pendiente. Por este motivo, se cree que es un transitorio inicial propio del modelo relacionado a las importantes perturbaciones que se le realizaron. De hecho, si se observa la figura 2.29-a y c se puede ver que si bien los gráficos respetan la misma diferencia de escala, la diferencia del pico es mucho más notorio en la perturbación de 10m que en la de 5m; esto nos hace pensar que es una situación inicial transitoria del modelo que se produce mientras se ajustan matemáticamente las variables. Cabe destacar que esta situación no perjudica en absoluto el correcto funcionamiento del modelo, ni siquiera perturba el volumen total de agua durante el período de simulación.

Si nos enfocamos en las imágenes 2.29-b y d podemos ver que la distancia entre los dos últimos picos es

prácticamente la misma, pero si observamos los kilómetros recorridos podemos ver que el frente de onda para una perturbación igual a 10m recorre mayor distancia en el mismo tiempo, es decir que la velocidad de avance varía con la magnitud de la perturbación inicial.

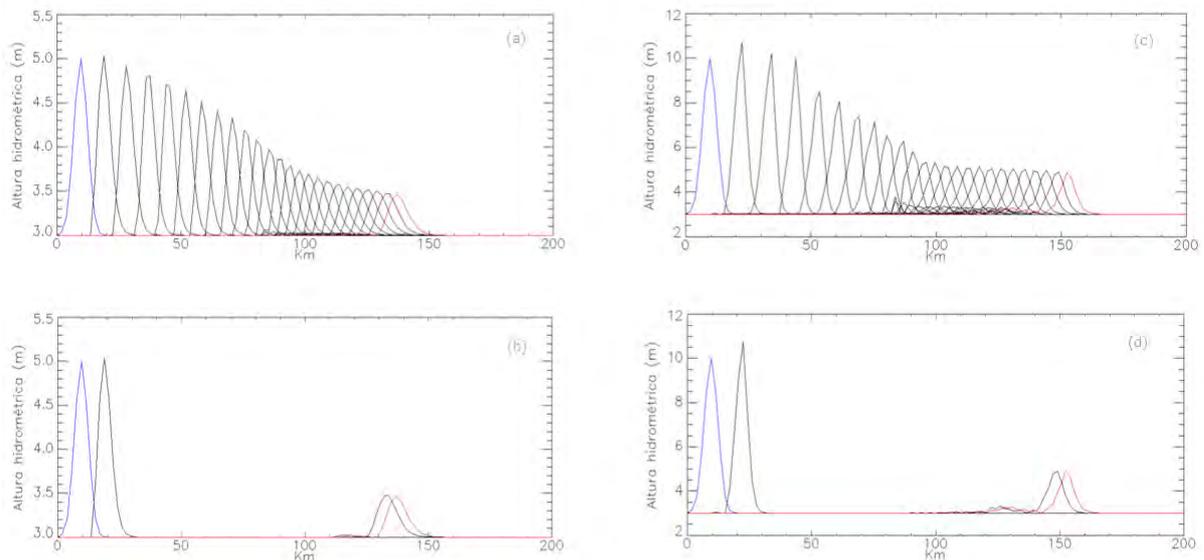


Figura 2.29: Avance de frente de onda en montaña: (a) Perturbación = 5m , 24 horas; (b) Perturbación 5m, horas iniciales y finales; (c) Perturbación = 10m , 24 horas; (d) Perturbación 10m, horas iniciales y finales

La figura 2.30 muestra la tasa de cambio del espacio con respecto al tiempo, donde se puede ver claramente lo antes mencionado.

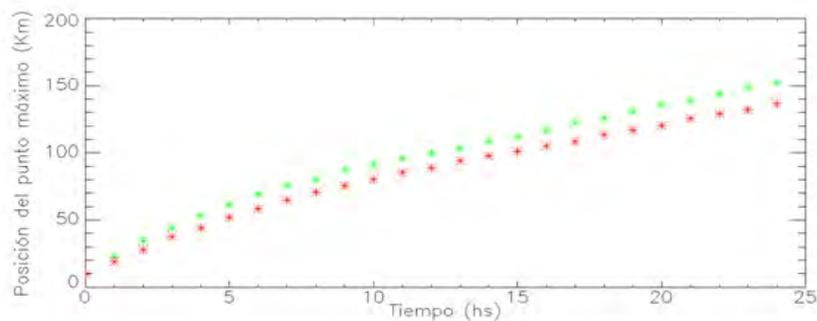


Figura 2.30: Tasa de cambio del espacio con respecto al tiempo. Color verde: velocidad de avance para 10m, Color rojo: velocidad de avance para 5m

2.6.1.2. Prueba 2: Planicie Alta

La figura 2.31 muestra los mismos resultados pero para las perturbaciones realizadas en la planicie alta. A comparación de la montaña el frente de onda avanza más lento que en la montaña, debido a que la pendiente en esta zona es inferior a la de la montaña. Esto puede observarse a simple vista, ya que los picos máximos están

más próximos uno resultando en una distancia recorrida final inferior que en la montaña.

Nuevamente los máximos convergen a 3m a medida que se ensancha la onda conforme pasa el tiempo y la velocidad de avance con una perturbación de 10m es superior a la velocidad obtenida con una perturbación inicial de 5m.

Si comparamos por ejemplo la imagen 2.31-d y la imagen 2.29-d se puede ver como varía la estructura de la onda, en el caso de la planicie alta la onda se ensancha más que en la montaña, esto está asociado a que la onda es más lenta debido a que tenemos una pendiente menor y un ancho de cauce mayor (ver figura 2.27, el ancho del cauce varía entre 77.8m y 422m)

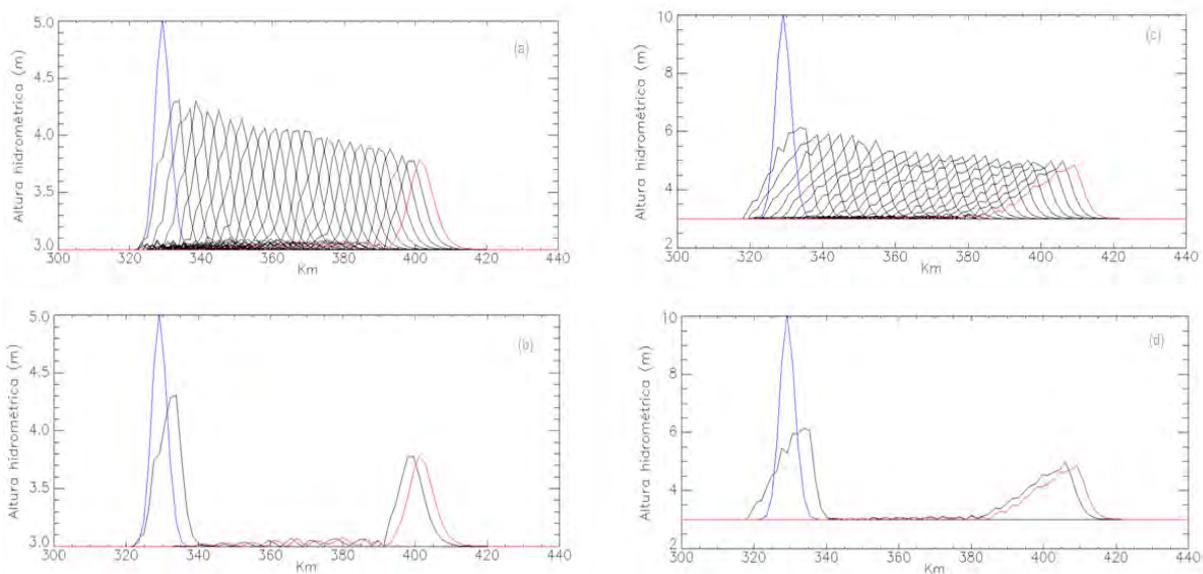


Figura 2.31: Avance de frente de onda en la planicie alta: (a)Perturbación = 5m, 24 horas; (b)Perturbación 5m, horas iniciales y finales; (c)Perturbación = 10m , 24 horas; (d)Perturbación 10m, horas iniciales y finales

2.6.1.3. Prueba 3: Planicie Media y Baja

En este caso de prueba unificaremos los resultados obtenidos para la planicie media y la planicie baja. La figura 2.32 muestra el corrimiento de la onda para 5m y 10m en la planicie media y baja. Este gráfico nos permite realizar comparaciones verticales y horizontales.

Podemos ver como varía la morfología de la onda y la distancia recorrida con respecto al valor de agua agregada para la misma ubicación geográfica. Haciendo un análisis horizontal la imagen permite comparar las distintas respuestas para la misma cantidad de agua pero en dos puntos diferentes, si bien los resultados son similares (esto se debe, entre otras cosas, que la diferencia de pendiente entre estos dos puntos es pequeña) existen pequeñas variaciones que pueden verse en 2.1.

Comparaciones: Como se menciono anteriormente, la pendiente influye en gran medida en la velocidad de avance del frente de onda. La figura 2.33 muestra las curvas de velocidades para las dos tipos de perturbaciones en

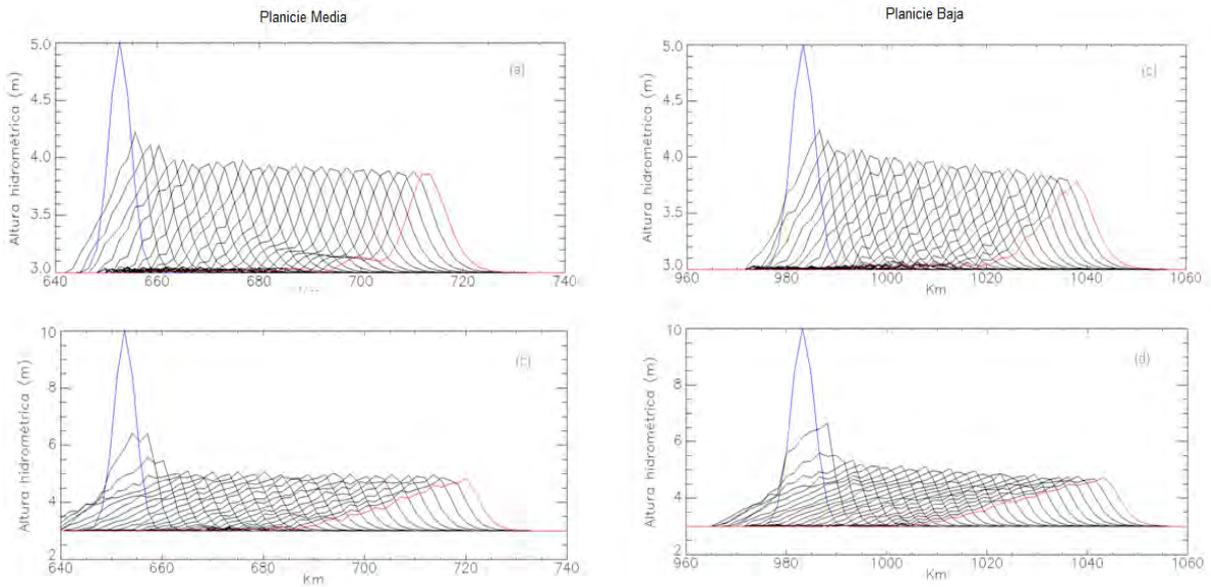


Figura 2.32: Avance de frente de onda en la planicie media y baja: (a)Perturbación = 5m en la planicie media; (b)Perturbación = 10m en la planicie media; (c)Perturbación = 5m en la planicie baja; (d) Perturbación = 10m en la planicie baja

los cuatro puntos de prueba. Se puede observar como la velocidad en montaña (color negro) es significativamente más alta que las otras tres. Por otro lado, no existe mucha diferencia entre la curva de velocidad en la planicie media y baja, ya que la pendiente no varía mucho entre estos dos puntos y es un valor de pendiente baja con respecto a la zona montañosa.

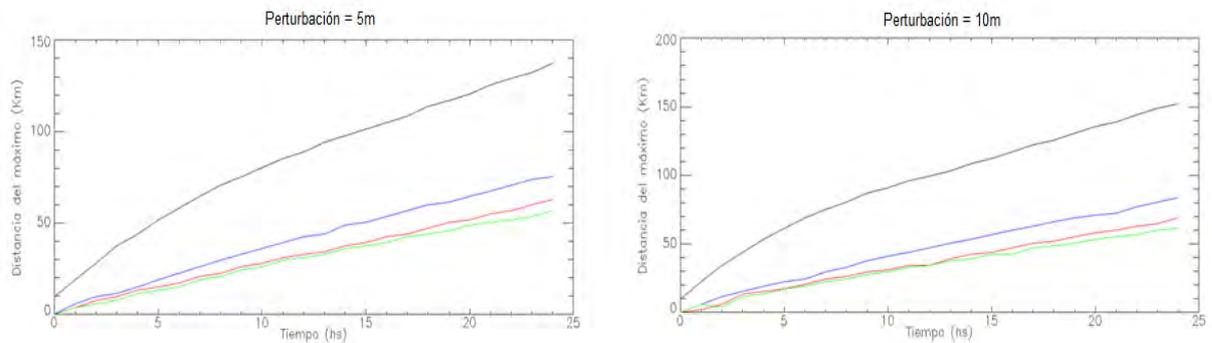


Figura 2.33: Curvas de velocidades para las dos tipos de perturbaciones en los cuatro puntos de prueba: Color verde = Planicie Baja, Color rojo = Planicie Media,Color azul = Planicie Alta,Color negro = Montañas

La tabla 2.1 muestra los datos obtenidos en cada una de las pruebas realizadas, organizadas por valor de perturbación y zonas geográficas.

Las variables expuestas son:

- número de pasos (nt) que equivalen a una hora, este dato depende del paso de tiempo (dt) y del paso de grabación.
- distancia (km) recorrida por el frente de onda

- velocidad de avance (km/h)
- altura máxima hidrométrica (m) en el paso inicial - H inicial max
- altura máxima hidrométrica (m) en el paso final - H final max
- caudal máximo (m³/s) en el paso inicial - Q inicial max
- caudal máximo (m³/s) en el paso final - Q final max

Tiempo de ejecución 1Día Variables	Montaña		Planicie Alta		Planicie Media		Planicie Baja	
	5m	10m	5m	10m	5m	10m	5m	10m
Nt	43	65	34	34	34	34	34	34
Dt (seg.)	83	55	105	105	105	105	105	105
Km recorridos	127.73	142.71	71.94	80.05	60.93	67.46	54.73	59.99
Velocidad (km/h)	5.32	5.94	2.99	3.33	2.53	2.81	2.28	2.49
Q inicial max.	846.79	2384.71	862.18	2525.16	863.09	2538.69	864.57	2549.32
Q final max.	502.94	851.89	577.66	862.74	605.15	860.81	576.75	829.35
H inicial max.	5	10	5	10	5	10	5	10
H final max.	3.46	4.86	3.77	4.83	3.85	4.85	3.78	4.73

Tabla 2.1: Valores obtenidos en cada prueba (con un tiempo de ejecución igual a 1 día) para cada zona y cada tipo de perturbación

2.6.1.4. Prueba 4: 10 días de ejecución sobre montaña

En este caso de prueba se agregó agua en la zona montañosa y se ejecuto el modelo para una simulación de 10 días.

Las variables obtenidas son igual a los casos anteriores, puede verse la distancia recorrida en 10 días por un frente de onda y la morfología de la onda. La onda recorre una distancia aproximada a 750 km, es decir la mitad de la longitud del río para una perturbación de 5m y un poco más (770 km) para una perturbación de 10m.

En la figura 2.34 puede verse como los picos máximos al inicio están más separados y luego comienzan a aproximarse a medida que avanza la onda en el espacio, es decir el frente de onda pierde velocidad, lo cual esta relacionado, según explicamos en la sección precedente, con la disminución de la pendiente y el ensanchamiento del canal.

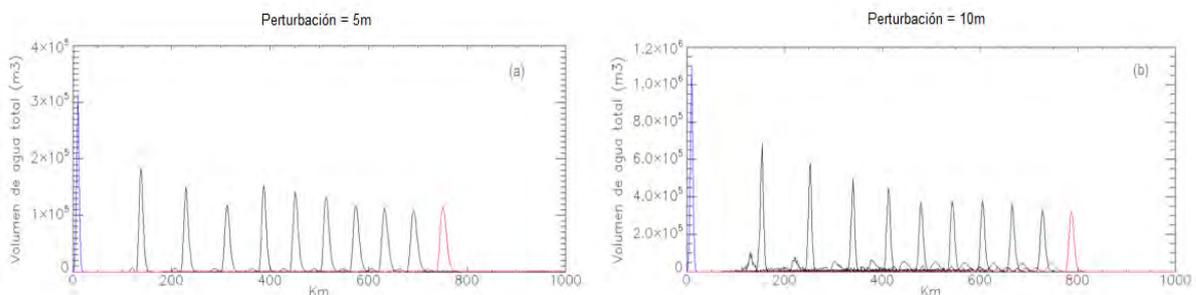


Figura 2.34: Variación del volumen de agua total en el tiempo: (a) Perturbación = 5m; (b) Perturbación = 10m

Variables	Montaña	
	5m	10m
Nt	1034	1569
Dt (seg.)	83	55
Km recorridos	741.3	776.83
Velocidad (km/h)	3.08	3.23
Q inicial max.	846.79	2384.71
Q final max.	443.76	529.70
H inicial max.	5	10
H final max.	3.19	3.55

Tabla 2.2: Valores obtenidos para perturbaciones en zona montañosa, con un tiempo de ejecución igual a 10 días

La figura 2.35 muestra el movimiento de los puntos máximos en el tiempo para las dos perturbaciones efectuadas. En color verde se representa la velocidad de avance para una altura hidrométrica de 10m y en color rojo para 5m.

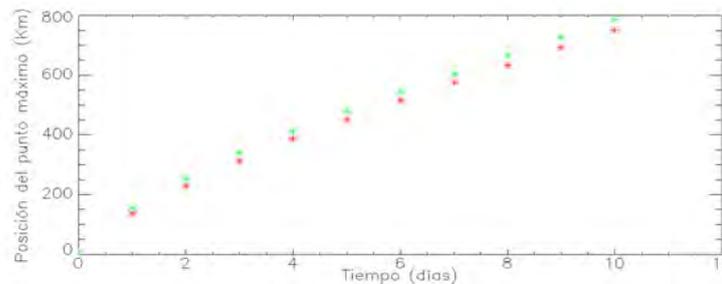


Figura 2.35: Tasa de velocidad para perturbaciones efectuadas sobre montaña: Color verde: velocidad de avance para 10m, Color rojo: velocidad de avance para 5m

Por último se expone la tabla con los valores obtenidos en este caso de prueba. Las variables consideradas son las mismas que las explicadas en la prueba 3.

2.6.2. Pruebas realizadas sobre la planicie aislada

Para evaluar la llanura en forma aislada se simularon lluvias circulares uniformes (capa de agua de 10cm) sobre distintas áreas de la planicie y se ejecutó el modelo con distintos tiempos de ejecución: 1 día, almacenando las salidas cada una hora, 10 y 20 días, guardando los resultados cada un día.

La figura 2.36 muestra la ubicación, vista de diferentes ángulos, de una lluvia simulada utilizadas para realizar las pruebas.

Los resultados obtenidos son visualizados en composición color utilizando paletas de color, lo que nos permite ver con más detalle los cambios en el avance del agua. El criterio elegido para presentar los resultados es mostrar la evolución de las salidas respecto del tiempo y del espacio. Primero se muestran los resultados obtenidos para un tiempo de simulación de una hora y luego para 10, 20 y 30 días.

La figura 2.37 muestra las salidas para 1 hora, 12 hs. y 24 hs. de simulación. En la primer imagen no se observan movimientos de agua, debido a que es muy poco tiempo de simulación, sin embargo puede verse

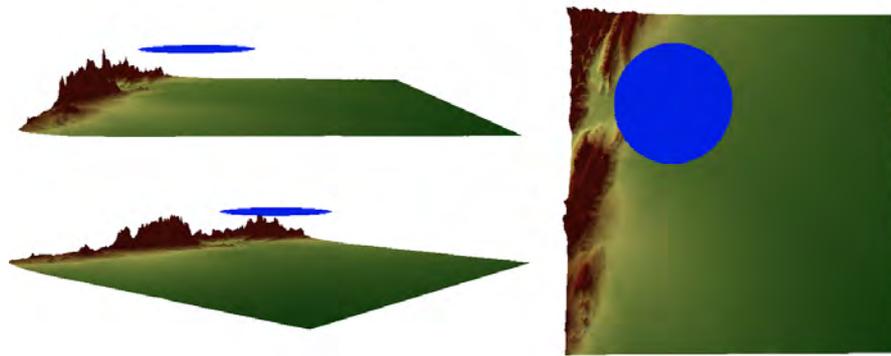


Figura 2.36: Vista de distintos ángulos de la ubicación de lluvia simulada

estampada la topografía del terreno. En la segunda imagen, comienzan a diferenciarse en color rojo, zonas con mayor altura de agua. Continuando el análisis entre las dos ultimas figuras, se puede ver como las zonas en color rojo comienzan a delimitarse. Se puede notar además (en la última figura) un aumento en el número de pixeles de color negro, los cuales indican ausencia de agua y pixeles azules los cuales corresponden a áreas donde antes había presencia de agua y actualmente no. Estas áreas muestran como el agua avanza con el paso del tiempo hacia zonas de menor altura.

Si bien estos resultados no permiten obtener grandes conclusiones, debido a que el tiempo de simulación es muy pequeño, las pruebas fueron ejecutadas para controlar la estabilidad numérica del modelo.

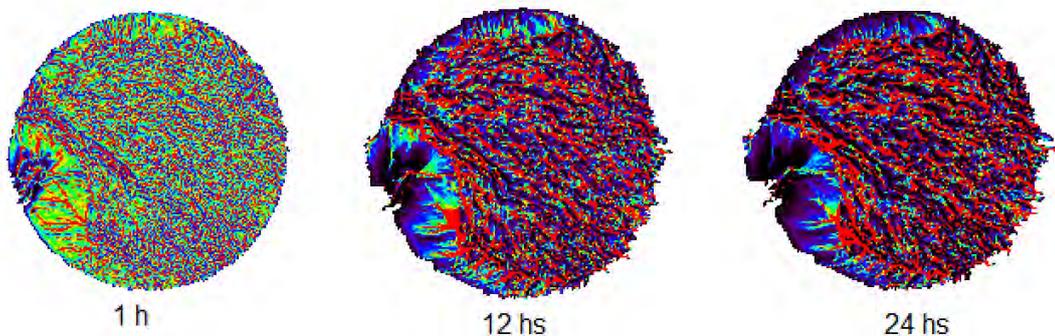


Figura 2.37: Salidas obtenidas para tiempos de 1h, 12hs y 24hs de simulación

A continuación se muestran tres composiciones color para mostrar el escurrimiento del agua sobre la llanura desde el primer día hasta los 30 días de simulación. La figura 2.38 muestra tres composiciones color para tres períodos de días distintos. La imagen 2.38-a corresponde a un composición entre el primer día de simulación, el quinto día y el décimo día; la 2.38-b está compuesta con las salidas a los 10, 15 y 20 días de simulación, y la última imagen corresponde a una composición color entre el primero, el décimo y el vigésimo día de simulación.

En general, se seleccionan tres imágenes para introducirlas en cada uno de los canales (R,G,B) que corresponden respectivamente a las ternas de días antes mencionadas. Estas composiciones ayudan a discriminar visualmente los elementos de interés, resaltando aquellos que presentan mayor reflectividad en las bandas uti-

lizadas. El orden y el criterio con el cual se seleccionó la combinación de imágenes y canales fue simplemente por su repuesta visual. Generalmente los colores fríos están relacionados a valores bajos, en este caso equivalente al menor número de días en la composición, lo que nos indicará la posición inicial del agua. Por lo contrario el color rojo nos delimitará claramente los nuevos segmentos hacia donde el agua ha avanzado.

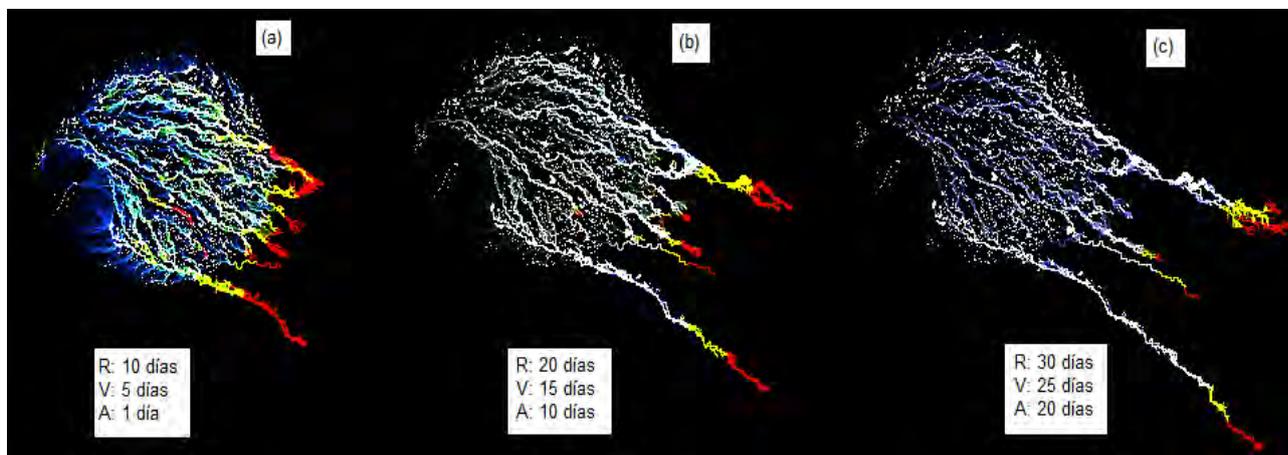


Figura 2.38: Imágenes en composición color con distintos períodos de simulación

En el primer análisis visual (considerando las tres imágenes) se puede observar como el agua comienza a agruparse y se escurre por superficies claramente delimitadas. Estas zonas pueden ser identificadas como canales principales, los cuales pueden compararse con los de la figura 2.16 de la subsección 2.5.2. Uno de estos canales corresponde al río Bermejo.

Composición color: Como se mencionó anteriormente la composición color nos permite identificar claramente los cambios ocurridos a lo largo de un período de simulación. Los colores puros (rojo, verde y azul) indican la presencia de agua solamente en el momento de tiempo correspondiente a la imagen ubicada en dicho canal. Es decir, por ejemplo, en la imagen 2.38-a, el color azul indica las superficies con presencia de agua en el primer día de simulación, de igual modo el color rojo revela la presencia de agua a los 10 días.

Por otro lado a través del análisis visual de la composición color podemos obtener más información con respecto al comportamiento general del agua. Los colores mezclados (por ejemplo el amarillo) dan aviso de que las bandas interactúan en dicha zona. Los diferentes colores compuestos que se forman dependen de cuánto aporta cada banda, es decir si la banda verde y azul, por ejemplo aportan en iguales cantidades y la roja no aporta nada, tendremos un color próximo al turquesa. En nuestro caso el nivel de aporte está vinculado directamente con la altura del agua en superficie.

El color amarillo es una mezcla de los colores verde y rojo (la graduación dentro de la gama del amarillo esta determinada por el grado de aporte de cada uno de estos); por lo tanto, analizando la imagen 2.38-b, podríamos concluir que las zonas pintadas de color amarillo indican la presencia de agua desde el día 15 hasta el día 20.

En la figura 2.38-c los sectores pintados de color azul oscuro indican que el nivel de agua en esa zona fue decreciendo mediante el paso de los días (sin desaparecer completamente a los 30 días); esto se puede concluir

debido al aporte gradual de los tres canales (más en el canal azul, menos en el verde, y poco en el rojo).

Por último el color blanco se construye por el máximo aporte igualitario de los tres canales (255,255,255). Esto en las imágenes nos expresa que el agua se mantiene en un área durante todo el período de simulación, con el mismo nivel de agua sobre la superficie. Por ejemplo en la figura 2.38-b las zonas coloreadas de blanco indican la presencia continua de agua durante los 20 días de simulación, probablemente correspondiente a depresiones topográficas.

Otra característica que se puede observar en la sucesión de imágenes de la figura 2.38 es el cambio en la tasa de velocidad a medida que el agua avanza hacia la llanura. Esto se ve claramente analizando visualmente las áreas pintadas en color rojo, donde cada 10 días la extensión de estos “filamentos” rojos disminuye.

Finalmente la imagen 2.39 muestra una composición color entre el primer día, el décimo quinto y el trigésimo día de simulación. En esta figura también se aplican los análisis realizados para la imagen 2.38 donde se puede ver distintas graduaciones del color azul. El color azul puro (0,0,255) marca la presencia de agua en el primer día de simulación. Se podría también analizar que los colores próximos al turquesa (los cuales tienen poco o nada de aporte del canal rojo), indican que los primeros 15 días hay presencia de agua, pero luego ésta se oscurece hacia otras zonas más bajas a medida que los días pasan .

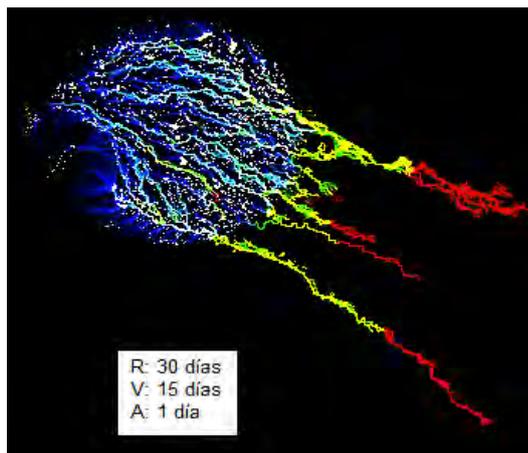


Figura 2.39: Composición color para un tiempo de simulación de 30 días

El gráfico 2.40 presenta los tiempos de ejecución para los períodos de simulación sobre la planicie. Este gráfico reafirma la elección de representar la planicie con grandes espaciamientos en la grilla (pixel de 1km) para minimizar el número de cálculos realizados para grandes extensiones.

2.6.3. Caso completo: unión del río y la planicie

En esta sección se presenta un análisis sobre la unión del río y la llanura de inundación. El gráfico 2.41 permite hacer un rápido análisis visual de las zonas posiblemente inundables, la línea recta de color rojo corresponde a una altura hidrométrica del río de aproximadamente de 10m a lo largo del cauce. Este valor fue obtenido suponiendo una situación de inundación cuyo caudal es igual a $3000\text{m}^3/\text{s}$, la cual es una buena aproximación considerando los caudales presentados por la Comisión Regional del Río Bermejo en eventos de crecida del río

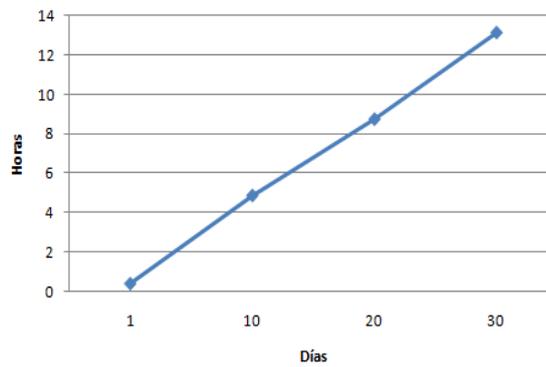


Figura 2.40: Tiempos de ejecución obtenidos en las distintas simulaciones realizadas en planicie

Bermejo.

La curva de color negro representa la diferencia de altura de los pixeles atravesados por el río entre la llanura y el lecho del río. Haciendo un rápido análisis visual puede observarse que hay tres claros sectores cuya diferencia de altura es inferior a 10m, es decir zonas potencialmente inundables cuando el río crece.

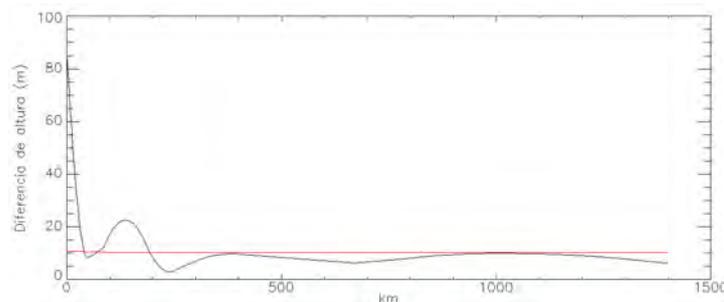


Figura 2.41: Gráfico comparativo para el análisis de crecidas del río Bermejo.

La prueba realizada consistió en simular una onda de 12m de altura ubicada inicialmente en zona montañosa y se estudió su comportamiento durante un período de 6 días (144 hs.) de simulación. Con esta prueba además de evaluar el comportamiento del río, en situaciones de crecida, se quiere comprobar la estabilidad numérica del modelo y la conservación de agua.

El gráfico 2.42 muestra el volumen de agua (m^3) del río, de la planicie y el total durante el tiempo de simulación. Se puede observar como se complementan estas curvas, conservando la masa de agua. Cuando el río disminuye su altura hidrométrica, el total de agua en superficie sobre la llanura aumenta, luego las dos curvas tienden a estabilizarse.

El comportamiento entre río y planicie responde principalmente a un balance entre entrega y recepción de agua. Cuando el río crece y sobrepasa el límite de cauce lleno, este entrega agua a la llanura de inundación. Por otro lado cuando el máximo del frente de onda del cauce se desplaza en el espacio, la altura hidrométrica del río disminuye y en estos casos generalmente la llanura aporta (devuelve) agua al cauce del río.

El color verde corresponde al volumen total de agua (río y planicie) a lo largo del período de simulación, la cual es constante y aprueba el principio de conservación de agua. En color azul se muestra el volumen de agua

total sobre la planicie y la curva trazada en color rojo corresponde al volumen de agua total sobre el río.

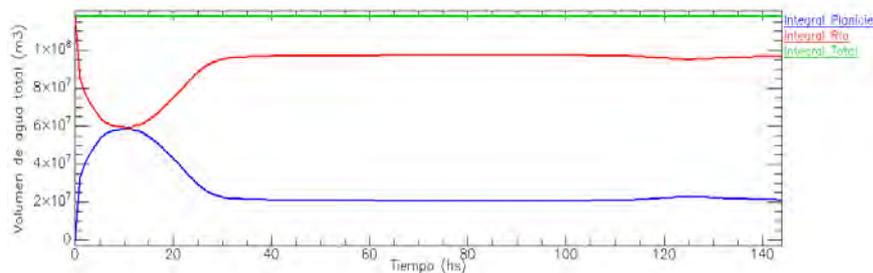


Figura 2.42: Volumen de agua (m^3) del río, de la planicie y el total durante el tiempo de simulación

La primera curva del río (y de la planicie respectivamente) se corresponde al sector ubicado entre los 200 y los 350 km debajo de la cota (línea roja) de la figura 2.41. El frente de onda que se traslada por el río llega a esta área con un altura hidrométrica superior a la altura del cauce lleno, provocando que el río desborde e inunde la planicie, lo que es equivalente al aumento del volumen de agua sobre la llanura y su disminución respectiva sobre el río. Esta situación es la que se ve reflejada en las curvas del gráfico 2.42.

Continuando con el análisis de la figura 2.42 puede verse una pequeña onda entre las 100hs. y las 140hs. Esta variación se corresponde geográficamente al área bajo la cota ubicada entre los 550km y 800km aproximadamente de la imagen 2.41. En este caso la onda es mucho menor con respecto a la primera debido a que el frente de onda llega a dicha área con una altura no muy superior al nivel de desborde del río.

Por lo tanto a diferencia de lo que se supuso cuando se analizó la imagen 2.41 no todas las zonas debajo de la cota (línea roja) se inundaron. Esto se debe a que la morfología del frente de onda cambia a lo largo de su recorrido, se ensancha y pierde altura (en parte por los aportes previos hechos a la planicie). La disminución de la altura hace que el río no alcance el límite de cauce lleno, evitando así desbordes.

La figura 2.43 muestra el frente de onda sobre el río para los seis días de simulación. En esta imagen se puede ver que la morfología del frente de onda es ligeramente diferente a la de los gráficos de la sección 2.6.1 debido a que en este caso la onda no sólo viaja en el río sino que aporta agua a la planicie, lo que provoca pequeños serruchos sobre la cresta de la onda como se observa durante el tercer día de simulación.

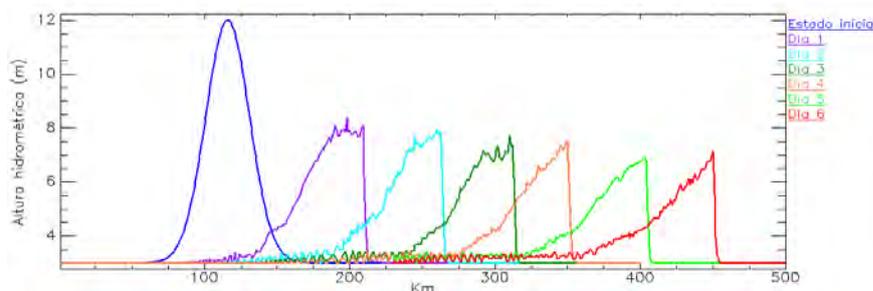


Figura 2.43: Volumen de agua (m^3) del río, de la planicie y el total durante el tiempo de simulación

La figura 2.44 muestra una composición color para la primera simulación realizada, la cual nos ayudará a

discriminar visualmente el comportamiento del agua. El canal rojo corresponde a la imagen del sexto día de simulación. En el canal verde se estableció la imagen obtenida el quinto día de simulación y en el canal azul la imagen de salida del primer día.

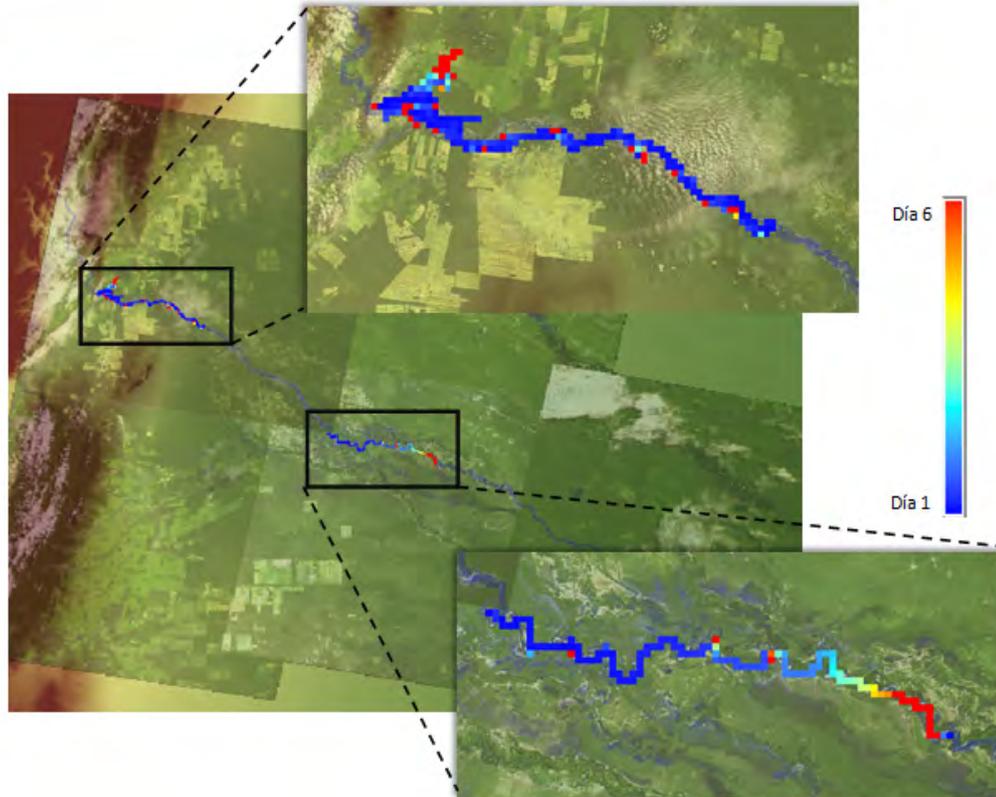


Figura 2.44: Mapa: ubicación geográfica de las zonas de desborde del río para 6 días de simulación

Composición color:

Como se indica en la figura 2.44 entre el quinto y el sexto día el frente de onda avanza aguas abajo, desbordando en dos áreas.

Las zonas pintadas de color azul en el área montañosa indican presencia de agua el primer día de simulación, las demás celdas sobre la llanura de pintadas de colores intermedios, incluido el azul, reflejan el avance de onda a medida que transcurren los días de simulación.

Las zonas pintadas de color rojo corresponden a celdas que contienen agua el sexto día de simulación. Se puede observar que además del desborde del río producido este último día, hay píxeles a lo largo de su recorrido pintadas de color rojo, lo que indica un posible anegamiento en esas zonas.

Continuando con el análisis de la imagen 2.44 se puede ver sobre la zona alta de la planicie, que entre los píxeles de color azul (primer día) y los píxeles de color rojo (sexto día) hay celdas pintadas de colores variados que reflejan que el agua de las celdas inicialmente azules se escurrió por la planicie a medida que pasaban los días hasta llegar celdas rojas.

2.7. Resumen de resultados

En el desarrollo de este capítulo se presentó un modelo para simular inundaciones de planicie en dos dimensiones para grandes extensiones priorizando el tiempo de ejecución y la eficiencia computacional. El modelo hidrológico consistió en la simulación de la dinámica del flujo en el canal principal, el escurrimiento en la llanura de inundación y el intercambio de agua entre el río y la llanura.

El flujo del canal fue modelado con un enfoque cinemático unidimensional (ecuación reducida de Saint-Venant) capaz de capturar la propagación de una onda de inundación aguas abajo. Los flujos de la planicie se describieron en términos de continuidad y momento discretizada sobre una grilla cuadrada bidimensional, lo que permitió modelar correctamente la inundación sobre la llanura causada por desbordamiento del río.

Resumiendo:

- Se desarrolló un modelo para la simulación de eventos de inundación de planicie adaptado a los datos disponibles.
- Los resultados mostraron la capacidad del modelo elegido para simular el comportamiento de procesos de escurrimiento sobre zonas con poca pendiente.
- Los datos de entrada disponibles: el DEM, el coeficiente de rugosidad en el canal principal y en la zona de inundación, algunos datos hidrológicos del río (como altura hidrométrica o caudal medio) y valores simulados de precipitación, demostraron ser suficientes para implementar una representación mínima del proceso capaz de realizar simulaciones dinámicas.
- Se aplicó el modelo sobre la cuenca del río Bermejo (río de llanura) ubicado al norte de nuestro país, procesando y ajustando las capas de entrada al modelo, de acuerdo a las características particulares de la zona.
- El modelo demostró que el agua de inundación se mueve más lentamente a través de la llanura de inundación que en el canal; a este comportamiento del modelo se lo vincula con el hecho de que el coeficiente de fricción es superior en la planicie que en el río. Además, se observó que el movimiento del frente de onda del canal fue gobernado predominantemente por la pendiente del lecho del cauce del río.
- Las pruebas realizadas permitieron verificar la estabilidad numérica del modelo y su adecuado comportamiento respecto a los principios hidráulicos tales como conservación de masa y conectividad de flujo.

Capítulo 3

La planificación en inteligencia artificial

3.1. Introducción

Los hombres se han denominado a sí mismos como *Homo sapiens* (hombre sabio) porque nuestras capacidades mentales son muy importantes para nosotros. Durante miles de años hemos tratado de entender como pensamos; es decir, entender como un simple puñado de materia puede percibir, entender, predecir y manipular un mundo mucho más grande y complicado que ella misma. El campo de la inteligencia artificial (o IA) va más allá: no sólo intenta comprender, sino que también se esfuerza en construir entidades inteligentes (Russell Stuart & Norvig, 2004).

La IA es una de las ciencias más recientes, comenzó a partir de algunos trabajos publicados en la década de 1940 que no tuvieron gran repercusión, pero en 1950 Turing consolidó el campo de la inteligencia artificial con su artículo *Computing Machinery and Intelligence*, en el que propuso una prueba concreta para determinar si una máquina era inteligente o no. Por esta famosa prueba se considera a Turing el padre de la Inteligencia Artificial (http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_inteligencia_artificial, 2011).

Aunque ya se investigaba en este área desde hacía varios años la historia de esta disciplina comienza formalmente en 1956, cuando se acuñó el término Inteligencia Artificial.

A lo largo de la historia se han seguido varios enfoques para definir que es la inteligencia artificial, algunas definiciones se refieren a procesos mentales y al razonamiento, en cuanto otras aluden a la conducta (Russell Stuart & Norvig, 2004). La Inteligencia Artificial puede definirse como “el arte de crear máquinas con capacidad de realizar funciones que realizadas por personas requieren inteligencia” (Rich & Knight, 1991). Según Bellman (1978), la Inteligencia Artificial es “la automatización de actividades que vinculamos con procesos de pensamiento humano, actividades como la toma de decisiones, resolución de problemas, aprendizaje,...”.

En los inicios de esta disciplina, los científicos perseguían un objetivo muy ambicioso: construir una máquina inteligente. Sin embargo, la IA ha resultado ser algo mucho más complejo de lo que muchos imaginaron en un principio. A medida que la investigación fue avanzando, se observó que el razonamiento genérico sólo se podía alcanzar mediante la comprensión de ejemplos más específicos de razonamiento humano. Por ello, la IA se dividió en diversos campos, cada uno de ellos dedicado a distintas áreas del razonamiento aplicado a la

resolución de problemas concretos. Uno de esos campos es la planificación (o *planning*).

El presente capítulo se enmarca en dicha área, siendo una aplicación que permite planificar adquisiciones de imágenes satelitales dependiendo de distintos criterios de evaluación. La planificación es una rama de la IA que se refiere a la construcción de secuencias de acciones denominados planes. La planificación básica está basada sobre la búsqueda de una solución para un problema matemático definido. Por [Malik et al. \(2004\)](#) la *planificación* se define como:

La planificación es la parte de razonamiento de la actuación. ... es un proceso de deliberación explícita que elige y desarrolla acciones anticipándose a los resultados esperados. Esta deliberación tiene como objetivo alcanzar de la mejor manera posible unos objetivos preestablecidos ([Malik et al., 2004](#)).

Una alternativa más acotada y acorde al propósito de este trabajo se brinda en el informe de la 7th Conferencia Internacional sobre Sistemas Inmune Artificial, ICARIS 2008, describe a la planificación de la siguiente manera:

[La Planificación] es un área que estudia la generación automática de un plan para resolver un problema dentro de un dominio particular. Básicamente, un plan es una secuencia de acciones provistas por un planificador que, dado un estado inicial, trata de encontrar la forma en que es posible alcanzar algunas condiciones de meta. Los planificadores pueden ser dependientes del dominio o independientes del dominio. Los planificadores independientes del dominio no están vinculados a un dominio en particular - que pueden resolver problemas en una variedad de diferentes dominios, dado un modelo del dominio en un lenguaje adecuado de entrada adecuado ([Bentley et al., 2008](#)).

Por lo tanto, un problema de planificación consiste en encontrar una secuencia de acciones que permita, partiendo de un dado estado, alcanzar un determinado estado objetivo. La resolución de un problema de planificación puede verse, básicamente, como un problema de búsqueda en un espacio de estados o de planes (parcialmente resueltos). Por lo tanto, el objetivo de un planificador consiste en explorar estos espacios de la forma más eficiente posible, o bien en reducir este espacio al máximo de manera que la búsqueda sea menos costosa. En cualquier caso, es necesario recurrir a técnicas sofisticadas para resolver el problema ([Ortega & García, sf](#)).

3.1.1. Antecedentes

Las raíces de la planificación en IA se encuentran en la resolución de problemas mediante la búsqueda en un espacio de estados y otras técnicas similares (GPS [Newell & Simon \(1963\)](#), QA3 [Green \(1969\)](#), etc.) y en las necesidades de la robótica. De hecho, se considera que la planificación como campo específico surgió hace tres décadas con el primer sistema de planificación implementado: STRIPS ([Fikes & Nilsson, 1971](#)), por Stanford Research Institute Problem Solver. Este planificador se diseñó para controlar a Shakey, un robot que deambulaba por las instalaciones de este instituto. Este trabajo de [Fikes & Nilsson \(1971\)](#) contiene contribuciones muy

importantes, como la definición de un lenguaje de especificación de problemas de planificación que ha servido como base para otros lenguajes considerados ahora como estándar.

A partir de STRIPS se produjo un importante auge dentro del área, del que surgieron numerosos planificadores como NOAH ((Sacerdoti, 1975), SNLP (McAllester & Rosenblitt, 1991), O-Plan (Currie & Tate, 1991), UCPOP (Penberthy & Weld, 1992)), etc. En toda esta labor investigadora se pueden observar dos tendencias claras:

- Los planificadores orientados a aplicaciones (también denominados dependientes del dominio) obtienen resultados excelentes en dominios específicos. Sin embargo, las técnicas desarrolladas en estos sistemas no son reutilizables en otros contextos.
- Los planificadores no orientados a aplicaciones (también denominadas independientes del dominio) resuelven un conjunto limitado de problemas, pero las técnicas que se desarrollan son totalmente generales y reutilizables.

Las grandes diferencias entre el rendimiento de los planificadores de ambas tendencias estimula la investigación en planificación independiente del dominio hacia la solución de problemas más complejos.

A principios de los años 90, la mayoría de los planificadores se basaban en el modelo de planificación de orden parcial (que define los planes sin necesidad de establecer un orden entre todas sus acciones), y ninguno de ellos podía generar planes de más de 30 acciones (Long & Fox, 2002). Esta situación, sin embargo, cambió radicalmente con la aparición en 1995 del planificador Graphplan (Blum & Furst, 1997), que seguía una nueva aproximación basada en grafos. El éxito de Graphplan revitalizó la investigación en el área de la planificación independiente del dominio.

En los últimos años, el rendimiento de las técnicas independientes del dominio ha experimentado mejoras significativas. Los nuevos planificadores desarrollados, como FF (Hoffman, 2001), LPG (Gerevini & Serina, 2000) o SGPlan (Chen et al., 2004), permiten resolver problemas más complejos, lo que se traduce en importantes avances en el área.

3.1.2. La planificación en la actualidad

Durante muchos años, los esfuerzos de investigación en el área de planificación se centraron en la búsqueda de soluciones óptimas. Debido a la intratabilidad del problema de planificación, los algoritmos desarrollados sólo eran capaces de resolver problemas muy sencillos. Para facilitar esta labor, se impusieron una serie de restricciones que pocas veces se satisfacen en aplicaciones reales como, por ejemplo, que el mundo es estático, determinista y totalmente observable (Veloso et al., 1998).

Un número cada vez mayor de investigadores se ha dado cuenta de que estas suposiciones no son válidas para muchos de los problemas reales de planificación. Consecuentemente, comenzaron a aparecer nuevas técnicas para relajar algunas de ellas. La planificación condicional (Peot & Smith, 1992), por ejemplo, elimina la necesidad de que el planificador tenga un conocimiento completo del mundo, mientras que la planificación probabilística (Goldman & Boddy, 1994) permite trabajar con acciones no deterministas.

Probablemente, una de las aproximaciones independientes del dominio más eficientes para la planificación en entornos dinámicos es la integración del proceso de planificación y ejecución (Ambros-Ingerson & Steel, 1988). El planificador genera progresivamente un plan al mismo tiempo que se ejecutan las partes del plan que ya han sido calculadas. De esta forma, el planificador puede incorporar información que sólo está disponible en tiempo de ejecución, y puede reaccionar ante cualquier situación inesperada (sin necesidad de haberla previsto anticipadamente).

Esta aproximación, sin embargo, requiere unos tiempos de respuesta razonables para evitar saltos en la ejecución. Muchos sistemas reales, además, necesitan que las acciones se lleven a cabo dentro de un plazo de tiempo limitado. En estos sistemas, que reciben el nombre de sistemas de tiempo real, el tiempo que se tarda en obtener la respuesta es tan importante o más que la respuesta en sí misma. Una consecuencia importante de los algoritmos de planificación en tiempo real es, por lo tanto, que no garantizan que se encuentre la solución óptima.

La tendencia de desarrollar planificadores muy eficientes que ofrezcan soluciones subóptimas es bien patente en la actualidad. La mayoría de planificadores actuales, como Metric-FF (Hoffman, 2003) o SGPlan (Chen et al., 2004), están diseñados con este objetivo.

3.2. Planificación clásica

El enfoque más tradicional al problema de planificación, conocido como *orientado a acciones* ve al mundo como una entidad que puede estar en diferentes *estados*, en el cual un estado puede ser modificado realizando *acciones*. La *teoría de dominio* especifica cuales reglas deben ser seguidas cuando las acciones son realizadas, es decir, en que condiciones pueden ser aplicadas y como el estado del mundo cambia como consecuencia de la aplicación de cada acción.

Una instancia de un problema de planificación en un dado dominio es encontrar una secuencia parcialmente ordenada de las acciones que, aplicadas al estado inicial del mundo, alcanza el estado final requerido (*goal*) satisfaciendo eventualmente varias condiciones sobre cual secuencia de estados el mundo debe atravesar (Fratini et al., 2008). En la planificación *orientada a acciones* el algoritmo de planificación busca en el espacio de estados definidos por una instancia de un problema para encontrar un estado en el cual un *goal* es alcanzado. Para cualquier estado se asume que existe una acción (o un conjunto de acciones) aplicable(s) que pueden transformar el estado en otro estado, excepto que dicho estado, sea un estado final. La tarea del planificador del problema es encontrar alguna composición de operadores que transformen un estado del mundo inicial dado en otro que satisfaga un conjunto de metas establecidas. Una característica distintiva de esta forma de planificación es una clara distinción entre *estado* y *acciones*. Desde el punto de vista de agentes inteligentes, el campo de la planificación busca construir algoritmos de control que permitan a un agente sintetizar una secuencia de acciones que le lleve a alcanzar sus objetivos.

Por lo tanto un problema de planificación es un problema de búsqueda que requiere encontrar una secuencia eficiente de acciones que conducen a un sistema desde un estado inicial hasta un estado objetivo. Más formalmente, un problema de planificación se puede definir mediante una tupla $P = \langle L, A, I, G \rangle$, donde cada uno

de estos elementos representa lo siguiente (Ortega & García, sf):

- L = conjunto de fórmulas atómicas, variables de estado o literales.
- A = conjunto de acciones definidas en la *teoría del dominio* ($a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$)
- I = conjunto inicial de literales que forman la situación inicial del problema
- G = conjunto final de literales que deben formar parte de la situación final del problema.

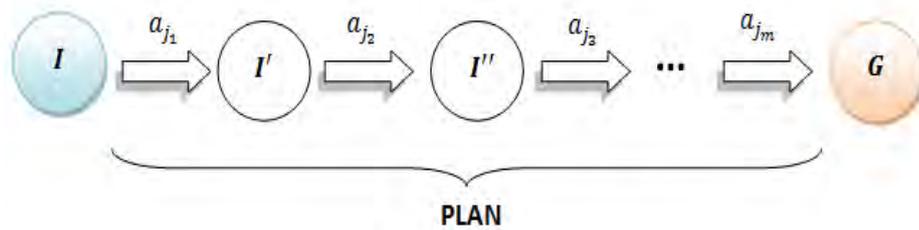


Figura 3.1: Esquema general de un problema de planificación donde $\{j_1, j_2, \dots, j_m\} \in \{1, 2, \dots, n\}$

3.2.1. Lenguajes de especificación

La representación de los problemas de planificación (estados, acciones y objetivos) debe hacer posible que los algoritmos de planificación se aprovechen de la estructura lógica del problema. Para lograr una planificación eficiente, es tan importante contar con buenos lenguajes de modelización como con buenos algoritmos. La clave está en encontrar un lenguaje que sea bastante expresivo para describir una amplia variedad de problemas, pero lo suficientemente restrictivo para permitir que algoritmos eficientes operen sobre él. El lenguaje STRIPS (Fikes & Nilsson, 1971) ha condicionado la gran mayoría de trabajos sobre planificación desde comienzos de los años 70, debido a su efectiva solución del problema marco (McCarthy & Hayes, 1969) y a su soporte para las estrategias de divide-y-vencerás (Geffner, 2000). Las dos extensiones más importantes de STRIP han sido ADL (Pednault, 1989) y PDDL (Long & Fox, 2002; McDermott, 2000).

Existen varios lenguajes que son usados para expresar dominios y problemas en la planificación clásica, pero solamente PDDL ha sido utilizado ampliamente, a partir de que se lo adoptó como lenguaje por opción en las competencias internacionales de planificación (IPC). Por lo tanto PDDL es el lenguaje elegido en éste proyecto. A continuación se describen algunas de sus características.

3.2.1.1. Planning Domain Definition Language - PDDL

La Conferencia Internacional sobre Sistemas de Inteligencia Artificial de Planificación (AIPS) reúne a investigadores que trabajan en todos los aspectos de los problemas en planificación, programación, planificación y aprendizaje, y ejecución de planes, para hacer frente a problemas complejos. En 1998, el Comité de Competencia de Planificación de la AIPS (encabezado por Drew McDermott) dio a conocer un lenguaje de descripción

de dominio de planificación, llamado PDDL (Gerevine & Derek, 2005; Ghallab et al., 1998; Long & Fox, 2002; McDermott, 2000). Fue usado por primera vez en esta competencia mundial de planificación en el año 98, celebrada en la Universidad Carnegie Mellon en Pittsburgh. Este lenguaje está basado en los formalismos de STRIPS (Fikes & Nilsson, 1971) y ADL (Pednault, 1989), y proporciona una forma común de describir los modelos de dominio de planificación.

A partir de entonces, PDDL se ha convertido en algo parecido a un estándar para la presentación e intercambio de modelos de dominio de planificación con el objetivo de medir la performance de los diversos algoritmos. La introducción del lenguaje ha facilitado el desarrollo científico de algoritmos de planificación, principalmente debido a la facilidad con que los sistemas estandarizados pueden ser comparados y la disposición de la enorme cantidad de recursos de planificación compartida. PDDL ha evolucionado con el tiempo, con revisiones menores y mayores, publicados en cada competencia de planificación: las versiones generalmente reconocidas son de 1.0 (utilizado en IPC 1998), 2.0 (utilizado en IPC 2000), 2.1 (utilizado en IPC 2002), 2.2 (utilizado en IPC 2004), 3.0 (utilizado en IPC 2006) y 3.1 (utilizado en IPC 2008).

ADL ha sido una de las ampliaciones de STRIPS más utilizadas por los planificadores, pero no es la única. Por ejemplo, FStrips (Functional STRIPS Geffner (2000)) es un lenguaje de primer orden, sin cuantificación, que trabaja con constantes, funciones y símbolos relacionales - pero no símbolos variables - e incrementa la expresividad del lenguaje. No obstante, la extensión de mayor éxito ha sido sin duda PDDL (Planning Domain Definition Language (Ghallab et al., 1998)). Desde su creación, PDDL ha supuesto un punto de referencia como lenguaje de modelado para la inmensa mayoría de los planificadores.

Aparte de STRIPS y ADL, PDDL ha recibido influencias de muchos otros formalismos: SIPE-2 (Wilkins, 1988), Prodigy 4.0 (Blythe et al., 1991), UCMP (Erol & Hendler, 1994), Unpop (McDermott, 1996) y UCPOP (Barrett et al., 1995). El objetivo del lenguaje PDDL es permitir modelar dominios expresando la física de los mismos, es decir definir qué predicados hay, qué acciones se pueden realizar y cuáles son sus efectos, así como definir instancias de problemas de planificación para esos dominios.

PDDL ofrece una gran variedad de características, entre las que destacan:

- Modelo de acciones basado en STRIPS.
- Efectos condicionales y cuantificación universal, tal como se propone en ADL.
- Especificación de acciones jerárquicas. Las acciones se descomponen en sub-acciones y sub-objetivos que permiten abordar problemas más complejos (HTN).
- Definición de axiomas del dominio. Los axiomas son fórmulas lógicas que establecen relaciones entre los hechos que se satisfacen en un estado (al contrario que las acciones, que definen relaciones entre sucesivos estados).
- Especificación de restricciones de seguridad. Estas restricciones permiten definir un conjunto de objetivos que deben cumplirse durante todo del proceso de planificación.
- Acciones con duración y métricas: Una de los principales aportas de la competición de planificación de 2002 fue una nueva versión del lenguaje PDDL: PDDL v2.1 (Fox & Long, 2003). Las características más

importantes que incorpora son la posibilidad de definir acciones con duración y de describir los efectos que el tiempo tiene sobre las acciones. Además, modifica el tratamiento de las expresiones numéricas y permite especificar, como parte del propio problema, una función objetivo (denominada métrica) que establece los criterios de optimización del plan.

Dado el gran número de características que se pueden expresar en PDDL, prácticamente ningún planificador existente es capaz de resolver problemas en todos los dominios que se pueden expresar. En la práctica durante la competencia sólo un conjunto reducido de estas características se utilizan. De esta forma, la primera distinción entre los planificadores es cuáles características son capaces de manejar. En el artículo de [Fox & Long \(2003\)](#), no sólo se presentó PDDL v2.1 con las características previamente mencionadas sino que por primera vez se presenta una semántica formal tanto para estas extensiones como para las características previamente en uso durante la competición.

En relación con este fin organizan PDDL v2.1 en los siguientes cuatro niveles:

- Nivel 1: comprende los niveles proposicional y ADL de la versión anterior de PDDL (el que se utilizó previamente en la competencia internacional de planificación)
- Nivel 2: establece una sintaxis definitiva para manejar expresiones numéricas. Las expresiones numéricas se construyen mediante operadores aritméticos y funciones numéricas. Estas funciones asocian valores numéricos a tuplas de objetos del problema. Las condiciones numéricas en las acciones son siempre comparaciones entre pares de expresiones numéricas, mientras que los efectos permiten modificar los valores de las funciones numéricas.
- Nivel 3: introduce el uso de acciones durativas discretas. De esta forma, es posible indicar en qué instantes durante y después de la ejecución de una acción ocurren sus efectos.
- Nivel 4: permite que las acciones durativas tengan efectos continuos. Para modelar estos efectos, se introduce el símbolo $\#t$ que representa el continuo transcurso del tiempo durante la ejecución de una acción durativa.

Más recientemente, una nueva extensión denominada PDDL+ añade un quinto nivel. Este nivel permite modelar eficientemente la aparición de eventos durante la ejecución de un plan. PDDL+ también soporta la modelización de procesos, que son actividades que, mientras duran, causan cambios continuos en los valores de las expresiones numéricas. Para más información sobre la sintaxis y semántica de PDDL, ver ([Ghallab et al., 1998](#)).

3.3. Problema de planificación

En esta sección se presentará el problema de planificación que se desea resolver y la motivación que nos impulsó a enfocarnos en él. Se dará una descripción general y una especificación matemática del problema.

3.3.1. Motivación

La enorme cantidad de datos provistos por los sensores espaciales generan la necesidad de optimizar el uso de recursos físicos y temporales. Los recursos físicos hacen referencia a la capacidad de almacenamiento a bordo del satélite y a los recursos computacionales en las estaciones terrenas para el procesamiento de datos.

El amplio grado de libertad que actualmente brindan los satélites se ve reflejado en el aumento del espacio de oportunidades y tipos de adquisiciones; esto sumado a la restringida ventana de tiempo de observación, hace casi imposible poder decidir cuales imágenes adquirir de las potencialmente obtenibles o deseable. Una forma prometedora de abordar este problema es reducir la cantidad de datos a procesar, decidiendo de forma selectiva cuales productos deberían ser adquiridos.

Como se mencionó en la introducción ante situaciones de grandes catástrofes se puede invocar a la Carta a través de un protocolo de activación que podría dividirse en cuatro etapas. Una de estas etapas, es la etapa de “adquisición” que suele demorar 2 días. Debido a que la variable tiempo es determinante frente a situaciones de emergencias, sería interesante poder disminuir el tiempo de demora durante esta etapa. Por otro lado, los satélites de observación de la Tierra requieren de una ventana de tiempo mínima (que puede variar de 6 hs. a 1 día) para configurar sus futuras adquisiciones, por lo tanto es importante reducir los tiempos a la hora de programar los pedidos de adquisiciones, evitando de este modo perder pasadas relevantes del satélite. Esto motiva a la utilización de herramientas de planificación como soporte en la adquisiciones de imágenes.

En el caso de que el pedido de imágenes no sean de carácter urgente, también existe un cronograma de planificación que un usuario al realizar un pedido debe tenerlo en cuenta. Actualmente en la Estación Terrena Córdoba la generación de productos se realiza de dos modos:

- A. Generación de producto por un pedido concreto: la producción está especialmente orientada hacia el usuario. En este caso no hay un requerimiento general, sino una solicitud específica.
- B. Generación de productos debido a la existencia de un requerimiento general: la producción está motivada por la existencia de un requerimiento general. En este caso, la práctica común es producir el mismo producto una y otra vez hasta que el requerimiento general sea modificado. En este esquema se definen requerimientos de ciencia pero congelados.

El problema que ocurre en la situación (B.) es que el requerimiento congelado a menudo conduce a la generación de diversos productos que en realidad no nos dan información relevante.

Está claro que un esquema que puede eventualmente generar productos que no son significantes para cualquier evento en particular es costoso y no es eficaz. De hecho, se pierde la oportunidad de optimizar los recursos para permitir la generación de productos que si sean relevantes. Por otra parte, en el caso de los sensores a bordo de satélites de observación de la Tierra, además de la sub-utilización de las capacidades de procesamiento en tierra, se está sub-empleando un recurso mucho más escaso: el sensor en sí mismo.

Actualmente, la mayoría de las misiones espaciales no tiene un sistema que pueda automatizar esta selección de productos, en la actualidad se reciben pedidos individuales que le determinan al operador humano cuáles zonas monitorear.

En nuestro caso particular estamos interesados en monitorear eventos de inundaciones, por lo tanto deseamos evaluar y decidir cuáles sensores son los más adecuados para utilizar, como así también sus patrones de medición (modos de adquisición) a fin de optimizar el uso del satélite, el tiempo de planificación y los recursos terrenos involucrados en la generación de productos. El plan propuesto es abordar el problema de planificación de adquisición de imágenes satelitales usando técnicas de Inteligencia Artificial.

Debido a que existe un gran número de satélites, sensores y modos de adquisición en este proyecto se fijó un satélite de trabajo reduciendo de este modo los grados de libertad sólo a los modos de adquisición de dicho satélite. En este caso se decidió operar con el satélite RADARSAT-2. Esta decisión fue tomada, entre otras cosas, por la razón de que el principal instrumento a bordo del RADARSAT-2 es un sensor activo que consiste en un radar de apertura sintética (SAR) que ofrece capacidades de cuadripolarización de gran utilidad frente a eventos de inundaciones. Además este satélite fue diseñado con 10 opciones de imágenes SAR, o modos. Cada modo ofrece una cobertura diferente de área y una resolución espacial variada. El instrumento SAR también ofrece una gama de ángulos de incidencia lo que permite elegir las posiciones del haz dentro de cada modo. Por lo tanto este satélite brinda un amplio abanico de productos para elegir, dándonos la oportunidad de tratar un dominio de nuestro problema de planificación suficientemente realista.

3.3.2. Descripción

Como se viene mencionando, actualmente existen varios satélites de observación de la Tierra, cada uno contienen un conjunto de sensores y a su vez cada sensor trabaja con varios modos de adquisición. Esto nos brinda un gran espacio de oportunidades para obtener imágenes, y una complejidad importante en la gestión del problema.

El satélite continuamente se mueve en su órbita y, simultáneamente, puede moverse alrededor de sus ejes de giro, inclinación y orientación, gracias a su sistema de control de actitud.

El núcleo del instrumento de medición a bordo está formado por un conjunto de fotodiodos alineados que permiten adquirir como un conjunto de píxeles alineados un segmento de la superficie de la Tierra. Los movimientos combinados de traslación y rotación del satélite permiten adquirir una imagen como un conjunto de segmentos contiguos (ver figura 3.2). Para simplificar su proceso, estas imágenes son restringidas a ser tiras rectangulares. El ancho y la longitud de estas bandas depende de los modos de adquisición.

Las solicitudes de observaciones que pueden ser enviadas por los usuarios se definen generalmente por: (a) un área objetivo, (b) un período de validez dentro del cual dicha adquisición es válida, (c) un conjunto de restricciones sobre el ángulo de incidencia de la adquisición y (d) un tipo de polarización asociado. Además, cada solicitud puede tener un peso, que expresa su importancia, dependiendo, por ejemplo si existe una situación de emergencia. Como la salida de nuestro problema de planificación es una lista de adquisiciones de imágenes, estas características deben ser consideradas.

Por ejemplo, frente a una evento de inundación, se necesita poder hacer un seguimiento en el tiempo a medida que el frente de onda avanza en el espacio. Por lo tanto se podría comenzar con un requerimiento sobre una zona inicial en un tiempo t y luego modificar la zona de interés en los tiempos siguientes acorde a la propagación

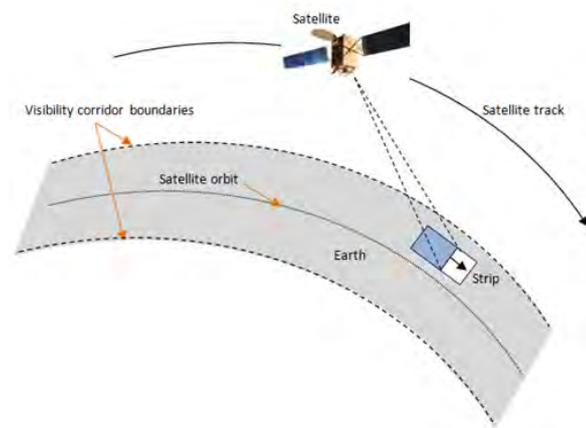


Figura 3.2: Geometría de una tira de adquisición de un satélite

del frente de onda. De esta forma se obtendrían imágenes, de las zonas afectadas principalmente en diversos momentos de tiempo, incluyendo también su estado pos-inundación.

El problema de planificación puede ser establecido de la siguiente manera. Dado:

- Un conjunto de imágenes candidatas sobre un área de interés, cada una asociada con pesos que reflejen la importancia de monitorear esa área y el interés de utilizar su modo de adquisición.
- Un conjunto de restricciones imperativas expresando las limitaciones físicas y temporales.

Se desea seleccionar un subconjunto de las imágenes candidatas las cuales satisfagan las restricciones impuestas. También se definen y establecen métricas (criterio de optimización) para elegir la mejor solución. El problema de planificación puede describirse informalmente de la siguiente manera:

- Entrada: un conjunto de imágenes I sobre un área dada la cual podrían ser adquiridas con respecto a la trayectoria del satélite, la capacidad de vista oblicua, los sensores disponibles y los modos de adquisición.
- Salida: un subconjunto admisible I' de I el cual cumple las restricciones.
- Restricción: Para cada pasada del satélite y para cada par (i, j) de imágenes candidatas, existe un tiempo mínimo de transición entre el tiempo final de la adquisición i y el tiempo de inicio de la adquisición j teniendo en cuenta el cambio de modos.
- Criterio de optimización: podemos basarnos en establecer varias métricas; por ejemplo maximizar el área cubierta, considerar primero las subáreas afectadas con una prioridad mayor o usar modos de adquisición más recomendables para ciertos eventos de emergencias. Se consideran las siguientes variables externas:
 - Para cada imagen, un peso positivo expresando el área cubierta por la imagen sobre la zona objetivo total
 - Para cada imagen, un número positivo o un conjunto de números positivos expresando la superficie útil de la imagen.

- Para cada imagen, un número natural expresando el modo de adquisición más apropiado para monitorear un cierto evento.
- Para cada imagen, un valor positivo indicando la prioridad del área a monitorear.

Estas variables serán obtenidas desde fuentes externas y serán ingresadas como parámetros al planificador. Más precisamente serán obtenidas desde la salida del software SaVoir (presentado en la subsección 3.4.2).

3.3.3. Especificación

Nuestro problema es un problema de planificación que consiste en decidir cuáles imágenes adquirir sobre un área en un tiempo determinado dependiendo los modos de adquisición de un satélite. Como en cualquier enfoque de IA, el paso básico en la solución del problema es la construcción de una representación (o modelo) del dominio el cual contiene los objetos relevantes y las limitaciones que influyen en la resolución del problema en el dominio particular.

Se han creado una o varias áreas de interés que permiten seguir el avance de la inundación. Cada una de estas áreas a monitorear podrían tener distintos niveles de prioridad, de acuerdo a los niveles de riesgo y la ubicación del frente de onda. Por ejemplo, se decide priorizar el área donde se encuentra el frente de onda en un tiempo determinado que el área por donde el evento ya ha pasado.

Con respecto a los valores de prioridad, utilizaremos una variable peso (número natural) para asignar las mismas. Se decidió que un valor bajo expresará prioridad alta, comenzando desde 1 hasta el número máximo de elementos a discriminar, por ejemplo si hay 3 regiones de interés, el valor de la variable peso irá entre 1 y 3 donde la región con valor 1 tendrá la prioridad más alta.

El problema puede ser matemáticamente declarado del siguiente modo:

Sea $D = \{1...n\}$ las áreas ha ser monitoreadas. Para cada $d \in D$ notamos por w_d a su peso asociado (lo que expresa su prioridad). Siguiendo lo antes mencionado w_n será igual a 1.

Sea I_d un conjunto de potenciales imágenes para ser adquiridas (con diferentes modos de adquisición, ángulos de incidencia y polarización) asociadas con un área de interés $d \in D$ y donde $I = \bigcup_{d \in D} I_d$ Para cada $i \in I_d$:

- Sea $[st_i, et_i]$ su ventana de tiempo, donde su tiempo inicial es st_i y su tiempo final es et_i .
- Sea ca_i el porcentaje del área cubierta por la imagen (valores de 0 a 100).
- Sea $am_i = 1...m$ un número natural expresando el modo de adquisición más apropiado dependiendo el tipo de emergencia que se desee monitorear. Donde m nunca es más grande que el total de modos. El número uno expresa prioridad alta.

Para cada par de imágenes $(i, j) \in I \times I$, sea tt_{ij} el tiempo de transición entre la imagen i la imagen j . Se considera que este tiempo es mayor cuando i y j tienen diferentes modos de adquisición, debido a que se debe considerar un tiempo mínimo de seteo para que el instrumento cambie de un modo al siguiente.

Restricción temporal

Toda imagen $i \in I$ debe cumplir que $st_i \leq et_i$. Luego para cada par $(i, j) \in I \times I$ se trabajó con una variable de decisión f_{ij} para la planificación de imágenes seleccionadas. f_{ij} es igual a 1 si la imagen i es seguida por la imagen j en la secuencia elegida y 0 en caso contrario.

Por lo tanto la selección de un subconjunto admisible I' de I es realizable dentro de un horizonte temporal de planificación $\mathcal{H} = [0, H]$ sii $\forall (i, j) \in I' \times I' : f_{ij} = 1 \Rightarrow et_i + tt_{ij} \leq st_j$.

Función objetivo

En caso de no establecerse métricas la mayoría de los planificadores utilizan por defecto la longitud del plan. Algunas métricas son tomadas en cuenta: Sea $(S, <)$ una solución factible donde $S \subseteq I$ y su orden se define como $< = \{(i_x, i_y) \in S \times S \wedge st_{i_x} < st_{i_y}\}$, notamos: $i_x < i_y$. Luego para cada par $(i_x, i_y) \in S \times S$ con $i_x < i_y$ se cumple que $et_{i_x} < st_{i_y}$.

Por lo tanto se define una solución ordenada como una sucesión de imágenes $(i_1, \dots, i_k) \in I^k$ tal que si $x < y \Rightarrow i_x < i_y$. Las soluciones deben satisfacer medidas de calidad de acuerdo a diferentes requerimientos. En particular, una solución óptima es una solución factible que minimiza la función objetivo como resultado de la combinación de diferentes subpartes:

$$F(S) = \alpha f_{ac}(S) + \beta f_s(S) + \delta f_{rm}(S) + \sigma f_{ps} \quad (3.1)$$

Donde α, β, δ y σ son constantes no negativas. Los valores de estas constantes son definidas acorde a un esquema prioridad; esto es cuál métrica domina sobre las otras, es decir que criterio de optimización se prioriza.

Las definiciones de las siguientes funciones se basan en los elementos ca_{i_j}, am_{i_j} con $i_j \in S$ y w_d con $d \in D$ cuyas definiciones fueron presentadas previamente, al inicio de la sección 3.3.3:

- f_{ac} mide la calidad de la solución con respecto al total de área cubierta:

$$f_{ac} = \sum_{j=1}^k 100 - ca_{i_j} \quad i_j \in S \quad (3.2)$$

El caso más óptimo de la función f_{ac} se produce cuando una adquisición cubre el 100% (o gran parte) de una región de interés, es decir el valor de ca_{i_j} es alto y el valor total $100 - ca_{i_j}$ es bajo. Como la solución óptima intenta minimizar la función f_{ac} , la adquisición i_j se convierte en una buena candidata para ser seleccionada por el planificador. El peor caso se produce cuando el valor de ca_{i_j} es próximo a cero, es decir cuando el porcentaje de cobertura de la adquisición i_j es muy bajo.

- f_s mide la calidad de la solución con respecto a las áreas con mayor prioridad, en el caso de que varias áreas deban ser monitoreadas:

$$f_s = \sum_{j=1}^k w_d * (100 - ca_{i_j}) \quad i_j \in S, d \in D \quad (3.3)$$

Esta función actúa de un modo similar a f_{ac} , con la diferencia de que el valor del porcentaje de área cubierta por adquisición es ponderada por la prioridad de la región asociada. En el mejor de los casos (en el cual las adquisiciones cubren toda la región - $ca_{i_j} = 100\%$) la sumatoria estará determinada por los pesos asociados a las regiones de interés (donde el valor 1 indica mayor prioridad). Cuando los porcentajes cubiertos por dos adquisiciones sean iguales o similares, el valor w_d finalmente decidirá cual adquisición de imagen seleccionar. En el peor de los casos, es decir la imagen que tendrá menos posibilidad de ser seleccionada, es aquella que cubra poco porcentaje de un área y que la prioridad de la región asociada a ella sea muy baja (equivalente a valores de w_d altos).

- f_{rm} mide la calidad de la solución con respecto al uso de adquisición más recomendado

$$f_{rm} = \sum_{j=1}^k \frac{am_{i_j}}{am_{max}} \quad i_j \in S \quad (3.4)$$

donde $am_{max} = \max(am_h)/h \in S$ esta es la prioridad más baja de los modos de adquisición usados en S .

Recordemos que $nro. \text{ total de modos} \leq am_{max} \geq 1$

La función f_{rm} considera la prioridad de un modo de adquisición, donde la prioridad depende de si un modo es apropiado para monitorar un evento de emergencia dado. En el peor de los casos $\frac{am_{i_j}}{am_{max}}$ es igual a 1, es decir am_{i_j} es igual a am_{max} , esto indicaría que el modo de adquisición de i_j no es el más apropiado y por lo tanto tiene asignada una prioridad baja. En el mejor de los caso, al modo considerado como más apropiado tiene prioridad igual a 1, provocando que la fracción $\frac{am_{i_j}}{am_{max}}$ sea menor o igual a 1.

- f_{ps} mide la calidad de la solución con respecto al número de imágenes en una solución S . Esto es un importante parámetro de calidad para el plan debido a que el satélite debe tener capacidad a bordo para almacenar cada imagen y luego cada imagen adquirida requiere, además de tiempo para ser descargadas desde el satélite, recursos terrenos suficientes para su posterior procesamiento. Por estas razones los planificadores prefieren fuertemente acortar los planes. Otro motivo por el cual es importante establecer este criterio es limitar el número de imágenes a ser adquiridas, ya sea por ejemplo por el alto costo que tiene cada imagen o por ejemplo en el caso de emergencias y la activación de la Carta Internacional “Espacio y Grandes Catástrofes”, existe un limite máximo de imágenes solicitadas establecido por cada agencia miembro.

$$f_{ps} = k \quad (3.5)$$

El conjunto anterior de métricas permite una comparación de diferentes soluciones para el mismo problema desde diferentes vistas. Por lo tanto, se puede convertir nuestro problema de optimización multi-objetivo en un problema de optimización de un sólo criterio.

3.4. Herramientas y datos utilizados para la implementación

El objetivo de esta sección es presentar los materiales y métodos involucrados en el desarrollo del problema de planificación y la obtención de la solución. Antes de exponer en detalle las características de cada elemento interviniente en el proceso, se explicará brevemente el rol que cumplió cada uno, por qué fueron elegidos y que aportaron a la solución final.

- Radarsat-2: Se eligió este satélite de observación de la Tierra, por el amplio grado de libertad que ofrece a la hora de seleccionar una imagen. Este gran abanico de posibles productos, nos brinda un margen suficientemente amplio en el problema de planificación.
- SaVoir: Es un software de gran utilidad para la planificación de adquisiciones de imágenes. En el contexto de este trabajo es utilizado para obtener el conjunto de potenciales productos ha ser adquiridos que, junto con otros datos de salida, conformarán las variables de entrada del planificador. Cabe destacar que este software podría ser reemplazado por cualquier otro que brinde información similar.
- Metric-ff: El problema establecido en este proyecto está basado en planificación clásica, es decir consiste en adquirir imágenes en el tiempo (acción). Existen varios planificadores en la actualidad capaces de resolver problemas de planificación clásica, pero no todos soportan el concepto de métricas, lo cual consideramos relevante en este problema; por esta razón se decidió trabajar con el planificador Metric-ff. Por otro lado Metric-ff ha demostrando un rendimiento muy competitivo en la tercera competencia internacional de planificación para dominios STRIPS y dominios (puramente) numéricos (Hoffman, 2003).

3.4.1. Características del satélite Radarsat

Radarsat-2 es un satélite de observación de la Tierra lanzado exitosamente el 14 de Diciembre del 2007 por la Agencia Espacial Canadiense (CSA). Radarsat-2 es una continuación de Radarsat-1, lo cual permite contar con datos históricos. El principal contratista del proyecto es *MacDonald Dettwiler and Associates (MDA)*, que previamente ha construido proyectos como el Canadarm. Radarsat-2 es propiedad y está operado por la MDA Esta subsección está dedicada a presentar algunas características del satélite.

Datos de Radarsat y beneficios de su aplicación:

Radarsat-2 ofrece una serie de beneficios, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Provee un set de opciones de resolución espacial que se acomoda a un amplio rango de aplicaciones, RADARSAT ofrece un amplia gama de productos a diferentes escalas y resoluciones que van desde los 3m a los 100m
- Incrementa el tiempo de revisita mejorando la eficiencia en el monitoreo, debido a la geometría de visualización flexible (visión de izquierda y derecha)
- Ofrece capacidades de cuadripolarización (HH, HV, VV y VH). Esto permite una mejor discriminación de diferentes tipos de superficies mejorando el reconocimiento y detección de objetos.

- Proporciona procesamiento en tiempo casi real (NRT) y entrega electrónica.
- Provee productos digitales georreferenciados que puede ser integrados con otros conjuntos de datos.
- Ofrece continuidad de los datos.

Este nuevo satélite es ideal para ser utilizado en labores de vigilancia como la detección de barcos, para la clasificación y detección de cambios como por ejemplo de cultivos y para operaciones en tiempo casi real como el monitoreo de emergencias.

¿En qué difiere Radarsat de los sensores ópticos?

Radarsat difiere de sensores ópticos en el tipo de datos que adquiere y en cómo estos datos son recogidos. Típicos sensores multiespectrales, como SPOT y LANDSAT, recogen la energía reflejada por la superficie de la Tierra en longitudes de onda cercanas a las detectadas por nuestros ojos. Estos sensores capturan la energía reflejada en una o más bandas de frecuencia. Cada banda o canal representa una única imagen de la superficie de la Tierra y puede ser interpretado individualmente o en combinación con otras bandas. Técnicas de procesamiento de imágenes permiten combinar estas bandas para producir una imagen en color de la superficie de la Tierra. Los sensores de radar como Radarsat, ERS, JERS hacen uso de la energía transmitida en frecuencias de microondas. Radarsat opera en una sola frecuencia de microondas, que genera un canal de datos y, en consecuencia, una imagen en blanco y negro. Esta imagen de “un canal” se puede combinar con varias fechas de datos Radarsat (por ejemplo, para detección de cambios) o con datos de otras fuentes. Como un sensor activo, el instrumento SAR de Radarsat transmite un pulso de energía de microondas directamente hacia la superficie de la Tierra. El sensor SAR mide la cantidad de energía que regresa al satélite después de que este pulso interactúa con la superficie de la Tierra. A diferencia de los sensores ópticos, la energía de microondas de Radarsat penetra en las nubes, lluvia, o niebla, lo que permite recoger datos en la mayoría de las condiciones atmosféricas. Radarsat además, puede adquirir imágenes independientemente de la iluminación solar, es decir funciona tanto de día como de noche.

Características de la órbita de Radarsat-2

Radarsat-2 tiene la misma órbita de Radarsat-1 y el mismo ciclo de repetición y trayectoria sobre el terreno y se ubica a una altitud de 798 km. Radarsat-2 esta separado de Radarsat-1 por medio período orbital (~ 50 min).

Radarsat órbita la Tierra catorce veces al día, usando una órbita sincrónica al sol alba-ocaso (*sun-synchronous, dawn-dusk*). En las órbitas de descenso, el satélite cruza el ecuador aproximadamente a las 6:00 hora local, y en las órbitas ascendente, el satélite cruza el ecuador aproximadamente a las 18:00 hora local (± 15 minutos). El tiempo efectivo en el cual el satélite pasa por encima de un determinado lugar varían con la latitud (Radarsat International, 1995).

Como resultado de su órbita, Radarsat ofrece dos direcciones de observación para ver la Tierra. Como Radarsat desciende desde el Polo Norte (una pasada de órbita descendente) considera la Tierra desde una

dirección mirada-oeste. A medida que asciende desde el polo sur (una pasada de órbita ascendente), ve la Tierra desde una dirección mirada-este (ver Figura 3.3). En la pasada ascendente, la dirección de observación es de aproximadamente 12° al Oriente, y en la pasada descendente la dirección de mirada es de aproximadamente 12° al Occidente (ver figura 3.4). La dirección de observación controla la orientación de los haces de radar con respecto a la alineación de las estructuras sobre la superficie de la Tierra (Radarsat International, 1995).

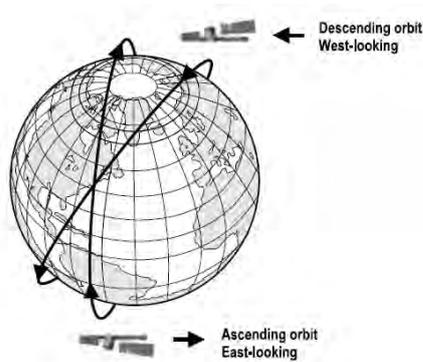


Figura 3.3: Dirección de observación de RADARSAT. Fuente: Radarsat International (1995)

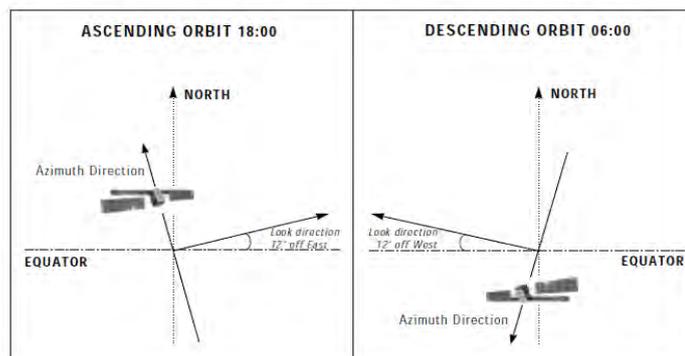


Figura 3.4: Órbitas ascendentes y descendentes de RADARSAT. Fuente: Radarsat International (1995)

El período de revisita de Radarsat es de 24 días. Esto significa que para todas las regiones geográficas, Radarsat demora 24 días para obtener exactamente la misma imagen (esto es, mismo haz, misma posición de haz, misma cobertura geográfica). Sin embargo, mediante el uso de múltiples modos de haces, las imágenes pueden ser adquiridas de manera más frecuente. Por ejemplo, el modo de haz ScanSAR puede ver un mismo lugar con tanta frecuencia como una vez al día en las latitudes altas, y en menos de cinco días en el ecuador (ver Figura 3.5).

El instrumento SAR

La antena Radarsat (de 15m x 1.5m) opera en la frecuencia de microondas (5.3 GHz) y trabaja con una longitud de onda de 5.6 cm, lo que se conoce como banda C. Esta banda que es capaz de penetrar las nubes y la precipitación, permitiendo obtener imágenes bajo cualquier condición meteorológica.

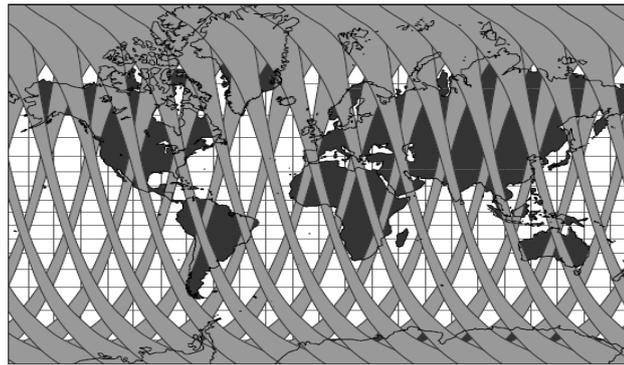


Figura 3.5: Ciclo orbital de 24 horas de RADARSAT usando el modo ScanSAR. Fuente: [Radarsat International \(1995\)](#)

Radarsat-2 es el primer satélite SAR comercial (Radar de Apertura Sintética) en ofrecer capacidades de cuadripolarización (quad-pol), es decir, el sistema de radar transmitirá y recibirá todas las combinaciones de ondas polarizadas simultáneamente, produciendo un completo set de datos polarimétricos (HH, HV, VV y VH). En otras palabras, 4 diferentes canales de polarización son adquiridos por imagen. Los datos quad-pol retienen la información de amplitud y de fase de las ondas de radar y la fase relativa entre los canales es también medida. Las variaciones en la señal de retorno (*backscatter*) son el resultado de los cambios en la rugosidad de la superficie y la topografía, así como propiedades físicas, tales como contenido de humedad y propiedades eléctricas

La polarización se refiere a la orientación de la onda de radar en relación a la antena SAR. Radarsat-2 puede transmitir las ondas de radar en ambas polarizaciones, Horizontal (H) y Vertical (V) y el sensor puede recibir el retorno de la onda en ambos canales H o V y en algunos casos en ambas polarizaciones inclusive. Esto produce señales co-polarizadas (HH y VV) y señales co-polarizadas cruzadas (HV y VH).

La información que se obtiene con un set de datos quad-pol mejora la habilidad para caracterizar las propiedades físicas de los objetos y la obtención de propiedades biofísicas o geofísicas de la superficie de la Tierra.

Modos y posiciones de los haces de Radarsat

El satélite Radarsat fue diseñado con 10 opciones de imágenes SAR, o modos de haz. Cada modo de haz ofrece una cobertura diferente de área (desde escenas de 20x20km hasta escena de aprox. 500x500km) y una resolución variada (desde 3m hasta 100 m). El instrumento Radarsat también ofrece una gama de ángulos de incidencia desde 20° a 60° (ver Figura 3.6) lo que permite elegir las posiciones del haz dentro de cada modo ¹ (ver Figura 3.7). Las opciones básicas de productos disponibles de Radarsat son el resultado de combinaciones óptimas de modo y posiciones del haz.

El acierto de inferir información útil desde una fuente de datos depende del nivel de detalle suministrado por la fuente de datos en comparación con la información requerida. Los datos de Radarsat tienen la ventaja de

¹NOTA: Radarsat asigna sus posiciones de haz por rangos de ángulo de incidencia predefinidos. Un ángulo de incidencia es el ángulo entre el haz del radar y la superficie plana de la Tierra.

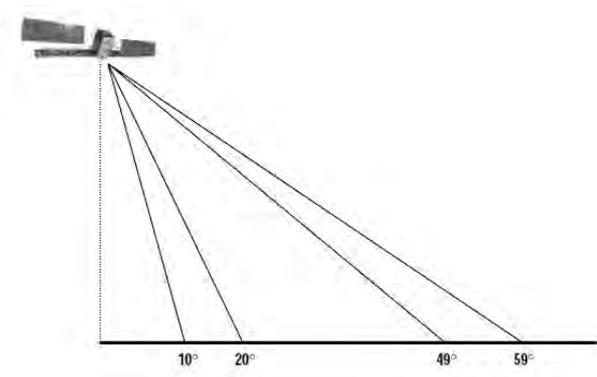


Figura 3.6: Rango de ángulos de incidencia de RADARSAT. Fuente: Radarsat International (1995)

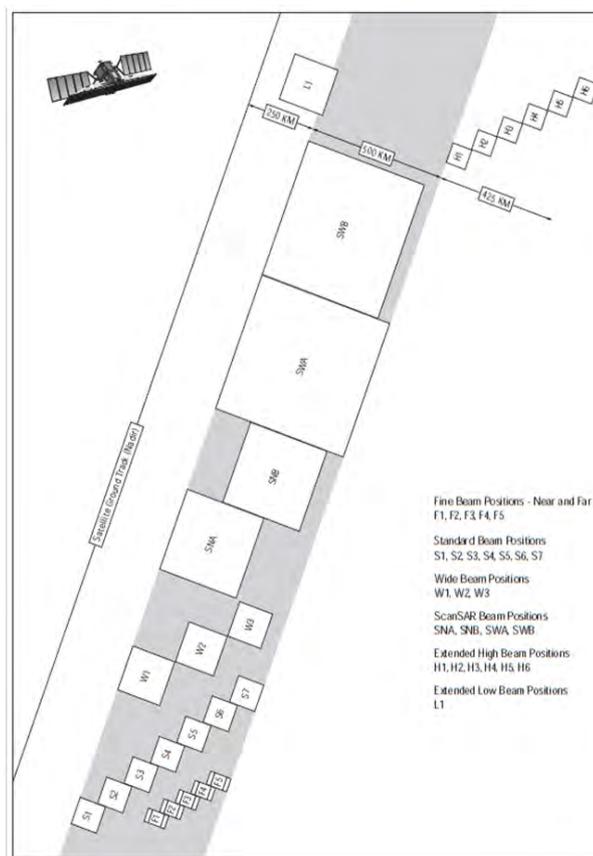


Figura 3.7: Modos y posiciones del haz de RADARSAT-1. Fuente: Radarsat International (1995)

proporcionar una amplia gama de productos de diferente escalas y resoluciones. Radarsat tiene siete modos de haz para la adquisición de datos. En la elección del modo más adecuado, se deberá tener en cuenta el tamaño del área de interés y el tipo de característica(s) que se desea de la imagen (Radarsat International, 1995).

Cada modo se define por el área que cubre y el nivel de detalle (resolución) disponible. Los modos *Wide* y *Standard* son útiles para monitoreo y programas de mapeo a escalas pequeñas (1:1.000.000 a 1:100.000), mientras que el modo *Fine* proporciona un nivel adicional de detalle para proyectos que requieren una escala mayor

Modo de Haz (Beam Mode)	Cobertura	Resolución aprox. (Rango) (Azimut)		Ángulo de incidencia aprox.	Polarización
Ultra-Fine	20 km	3 m	3 m	30° - 49°	Polarización Single
Multi-Look Fine	50 km	8 m	8 m	30° - 50°	
Fine	50 km	8 m	8 m	30° - 50°	Polarización Single o Polarización Dual
Standard	100 km	25 m	26 m	20° - 49°	
Wide	150 km	30 m	26 m	20° - 45°	
ScanSAR Narrow	300 km	50 m	50 m	20° - 46°	
ScanSAR Wide	500 km	100 m	100 m	20° - 49°	
Extended High	75 km	18 m	26 m	49° - 60°	Polarización Single
Fine Quad-Pol	25 km	12 m	8 m	20° - 41°	Polarización Quad.
Standard Quad-Pol	25 km	25 m	8 m	20° - 41°	

Tabla 3.1: Flexibilidad en la elección de productos con RADARSAT-2. Fuente: http://www.esri.chile.com/biblioteca/RADARSAT_2.pdf (2011)

(1:250.000 a 1:50.000). El modo *ScanSAR*, una característica única de Radarsat, ofrece cobertura repetida de grandes áreas y brinda información crítica para la planificación de operaciones estratégicas, tales como los buques de enrutamiento a través de las regiones polares o la vigilancia de costas. *ScanSAR* proporciona información a escalas en el orden de 1:5.000.000 a 1:250.000 (Radarsat International, 1995).

La siguiente tabla resume todas las posibilidades de productos para elegir con Radarsat-2 (tabla 3.1).

3.4.2. Software SaVoir

El software (SaVoir - Planificador de adquisiciones de barrido) fue escrito para los propósitos de la Carta Internacional “Espacio y Grandes Catástrofes”. El visor de adquisición de las franjas satelitales es un aplicación de Windows independiente para analizar las posibles oportunidades de sensado remoto desde los satélites de observación de la Tierra. Mediante la combinación de las órbitas de cada satélite, la geometría del sensor y la forma y la ubicación de un área de interés, definida por el usuario, SaVoir puede determinar el momento exacto en que un satélite será capaz de observar el área especificada.

Es un software de gran utilidad para la planificación de adquisiciones de imágenes. Provee una extensa lista de herramientas para el manejo de satélites y sensores. Permite configurar nuevos satélites y sensores y/o actualizar las órbitas o modificar los parámetros de los instrumentos ya cargados en el software.

La planificación desarrollada por SaVoir se basa en la creación de escenarios. Los escenarios describen las posibilidades de adquisición, en el pasado o futuro, de los satélites sobre una región particular. Un mínimo de tres componentes son necesarios para definir un escenario:

- Un período de tiempo (fechas de inicio y fin).
- Un área de interés (ubicación geográfica).
- Una lista de los satélites (y sensores).

A continuación se explicarán los pasos generales para definir un escenario:

Seleccione un período de tiempo

Definir horas de inicio y finalización de un escenario. Los valores pueden ser introducidos modificando los valores directamente haciendo click el icono desplegable para abrir un calendario y seleccionar la fecha (ver figura 3.8).

También es posible seleccionar una serie de opciones adicionales para configurar el período de tiempo, un menú permite avanzar rápidamente hacia atrás y hacia adelante o establecer la fecha al tiempo actual. Dentro de las opciones avanzadas ofrecidas por el software se puede seleccionar los límites de la órbita de satélites específicos y la duración en unidades de tiempo diferentes.

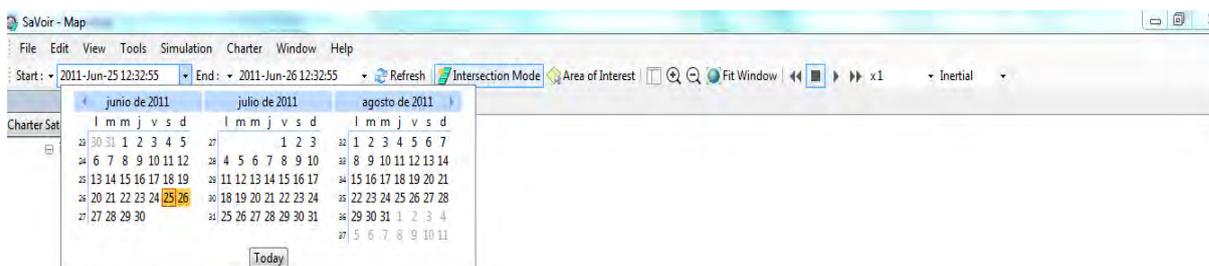


Figura 3.8: Menú para establecer la ventana de planificación en el software SaVoiR

Definir un área de interés

Durante la definición de un escenario, las áreas de interés pueden ser creadas desde la vista de mapa o desde la barra de herramientas. Se pueden crear polígonos personalizados, círculos, rectángulos, definir polilíneas y puntos. Además, el software permite exportar las áreas creadas e importar vectores externos.

A partir de dos o más áreas de interés se puede realizar uniones o intersecciones sobre las mismas para crear una sola área (figura 3.9). Una vez creada las áreas de interés se muestran en la parte inferior del panel de escenario, por debajo de la lista de satélites

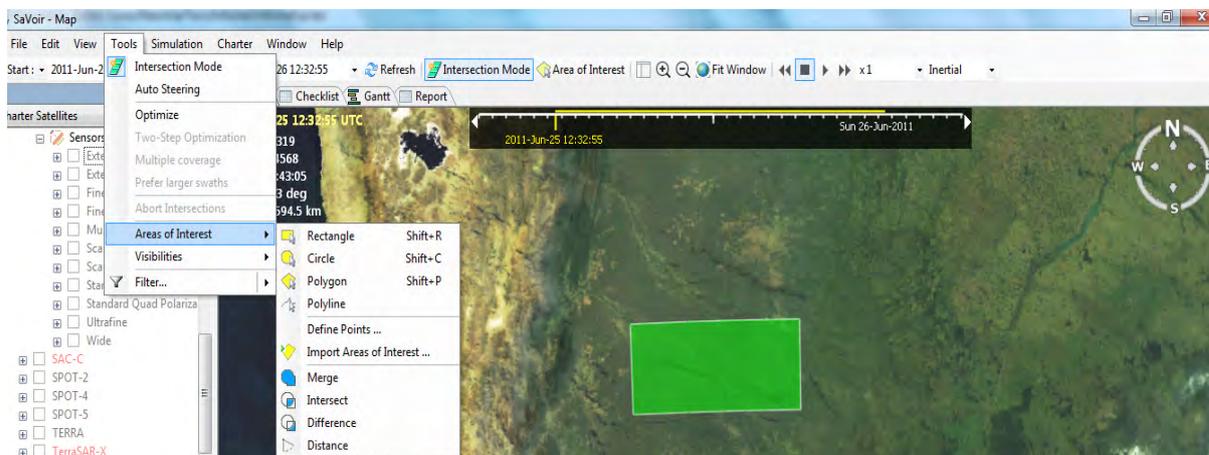


Figura 3.9: Menú para crear el área de interés con el software SaVoiR

Seleccionar satélites y sensores

Los satélites y sensores para un escenario pueden ser seleccionados desde el panel de escenarios.

Una vez que la información del escenario ha sido ingresada, se puede visualizar la intersección de los modos. Las salidas son mostradas en las pestañas Map, Gantt y Reports (ver figura 3.10)

Si el modo de intersección no es seleccionada, el área de interés de entrada no se tiene en cuenta y se muestra la información completa de todas franjas de los satélites elegidos para el intervalo de tiempo establecido.

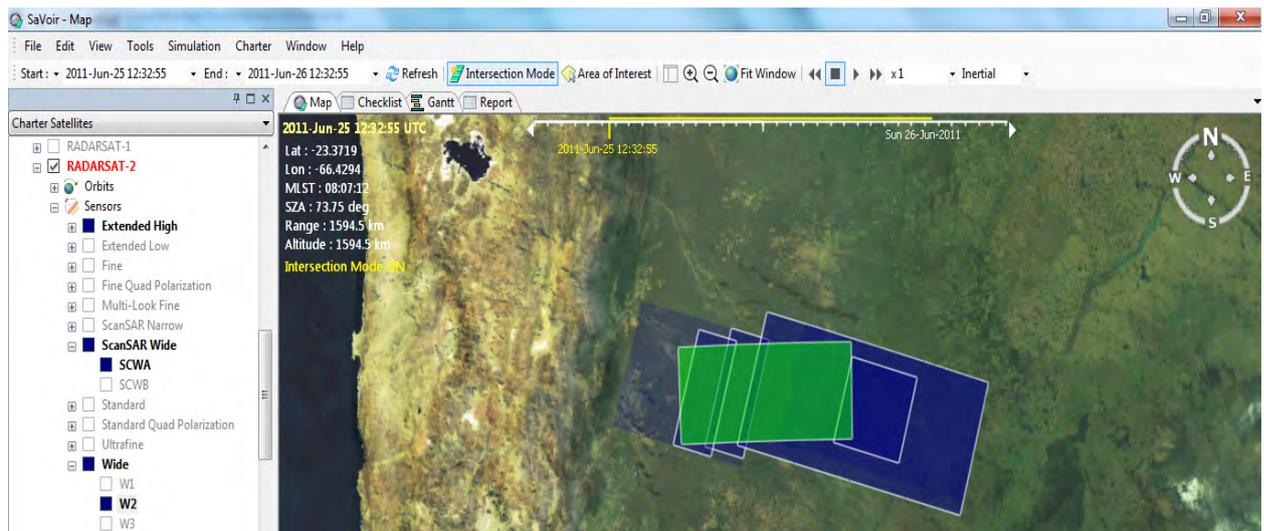


Figura 3.10: Seleccionar el satélite y los sensores de interés en el software SaVoiR

Salidas

Los datos de salida, además de poder ser visualizados por pantalla, pueden ser exportados como planillas de excel o guardados en archivos con formato *XML* (Extensible Markup Language). *XML* tiene un papel muy importante ya que permite la compatibilidad entre sistemas para compartir la información de una manera muy segura, fiable y fácil.

SaVoiR provee una extensa lista de variables de salidas, entre otras podemos mencionar las siguientes:

- porcentaje de área cubierta sobre la zona de interés por un modo de adquisición.
- tiempo de inicio del modo
- tiempo final del modo (a partir de estos dos datos se puede obtener la duración del modo de adquisición)
- número de ciclo
- tipo de pasada: ascendente o descendente
- latitud y longitud del punto central del modo
- ángulo de incidencia

- número de órbita
- nombre del sensor
- nombre del modo del sensor
- porcentaje de la franja que cubre el área de interés (dato importante para conocer la utilización real del satélite)

La imagen 3.11 muestra una pantalla del software donde puede verse la planificación de los sensores y modos seleccionados agrupados por área de interés y satélite. Puede observarse, además, la lista de variables de salida.

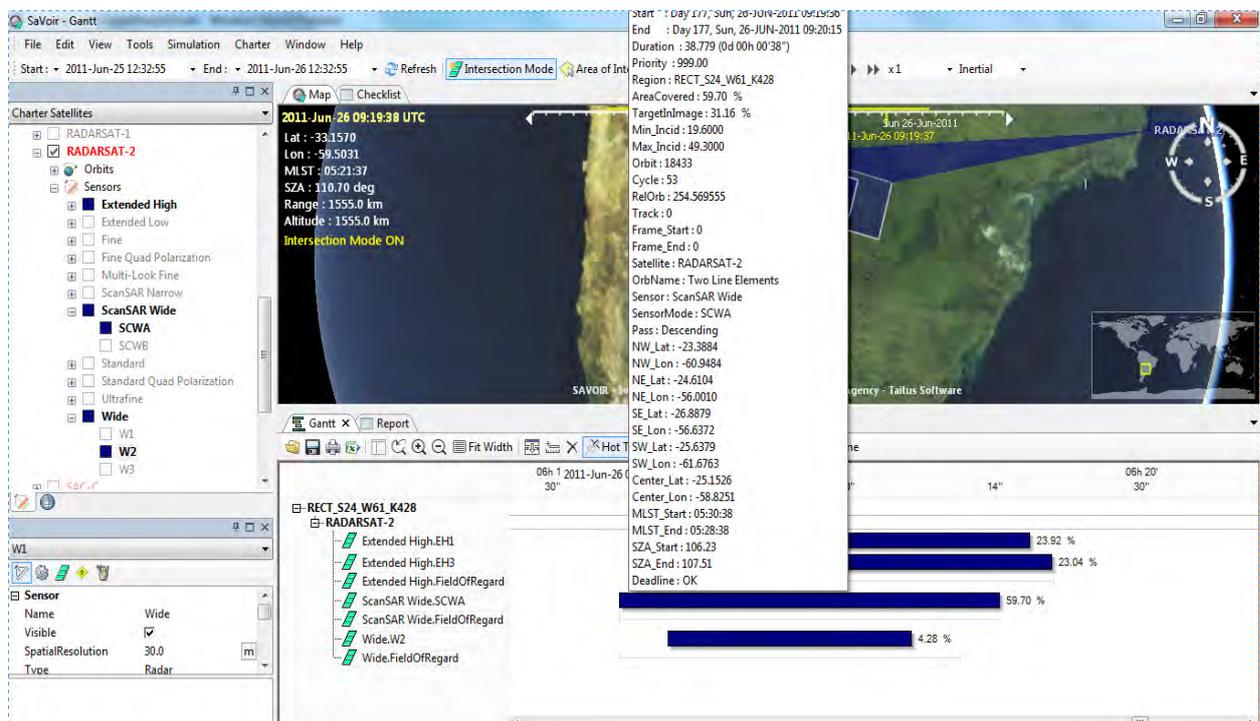


Figura 3.11: Vista del diagrama de Gantt y las variables de salidas

3.4.3. Planificador Metric-FF y algoritmos de búsqueda

Una vez formulado el problema de planificación es necesario resolverlo. Esto se hace mediante búsqueda a través del espacio de estados. La tarea del planificador es encontrar una secuencia parcialmente ordenada de las acciones que, aplicadas al estado inicial del mundo, alcanza el estado final satisfaciendo eventualmente varias condiciones sobre los estados del mundo que atraviesa. El algoritmo de planificación busca en el espacio de estados del mundo para encontrar uno en el cual una meta dada es alcanzada. Esa búsqueda puede realizarse de varios modos.

Esta sección presenta el planificador Metric-FF, el cual fue elegido (entre otras cosas por su buen manejo de métricas) para resolver los problemas y explica como opera en el espacio de estados para alcanzar una solución.

Las estrategias de **búsqueda no informadas** pueden encontrar soluciones en problemas generando sistemáticamente nuevos estados y comparándolos con el objetivo. El término significa que ellas no tienen información adicional acerca de los estados más allá de la que proporciona la definición del problema, todo lo que ellas pueden hacer es generar los sucesores y distinguir entre un estado objetivo de uno que no lo es. Algunas estrategias de búsqueda englobadas bajo el nombre de búsqueda no informada son los algoritmos conocidos como búsqueda primero en anchura o profundidad. Lamentablemente, estas estrategias son increíblemente ineficientes en la mayoría de los casos.

Las estrategias que saben si un estado no objetivo es “más prometedor” que otro se llaman **búsqueda informada o búsqueda heurística**. Una estrategia de búsqueda informada (la que utiliza el conocimiento específico del problema) puede encontrar soluciones de una manera más eficiente. Los algoritmos de búsqueda implementados en Metric-FF utilizan funciones heurísticas. Las funciones heurísticas son la forma más común de transmitir el conocimiento adicional del problema al algoritmo de búsqueda.

Metric-FF (*Fast Forward*) es un sistema de planificación independiente del dominio desarrollado por Jörg Hoffmann. Este sistema es una extensión del planificador FF (combinado con ADL) para variables de estado numéricas. Este sistema está implementado completamente en C. Ha participado en la tercera IPC en los dominios numéricos, demostrando un rendimiento muy competitivo.

Tanto el dominio como el problema que se le ingresa a Metric-FF debe estar especificado en lenguaje PDDL 2.1. Metric-FF tiene además la opción de indicarle un fichero de reglas de control en el que se basará el planificador, con el fin de minimizar al máximo el árbol de búsqueda explícito generado por el estado inicial y la función sucesor.

Naturalmente, Metric-FF hereda las ideas principales utilizados en FF. La búsqueda es una variación del algoritmo *hill-climbing* en el espacio de todos los estados alcanzables, y la evaluación de heurística se hace por medio de la resolución de una tarea relajada en cada estado individual de la búsqueda, utilizando un algoritmo del estilo de Graphplan (es decir, resolver las tareas relajadas). Para más información ver anexo A.2.

Metric-FF implementa dos algoritmos de búsqueda, el configurado por defecto es **Enforced-hill-climbing (EHC)**. En caso de no encontrar una solución con este algoritmo, el planificador realiza un segundo intento con el algoritmo **Best-First Search** (búsqueda primero el mejor).

- **Best-First Search:**

A la aproximación más general considerada, se le llamará búsqueda primero el mejor. La búsqueda primero el mejor es un caso particular del algoritmo general de búsqueda-árbol o búsqueda-grafo en el cual se selecciona un nodo para la expansión basada en una función de evaluación $f(n)$. Tradicionalmente, se selecciona para la expansión el nodo con la evaluación más baja, la cual mide la distancia al objetivo.

El nombre de “búsqueda primero el mejor” es venerable pero inexacto. A fin de cuentas, si nosotros realmente pudiéramos expandir primero el mejor nodo, esto no sería una búsqueda en absoluto; sería una marcha directa al objetivo. Todo lo que se puede hacer es escoger el nodo que parece ser el mejor según la función de evaluación. Si la función de evaluación es exacta, entonces de verdad sería el mejor nodo; en la práctica, la función de evaluación nunca será exacta, y puede dirigir la búsqueda por mal camino.

Hay una familia entera de algoritmos de búsqueda primero el mejor con evaluaciones diferentes. Una componente clave de estos algoritmos es la función heurística, denotada como $h(n)$:

$$h(n) = \text{coste estimado del camino más barato desde el nodo } n \text{ a un nodo objetivo.}$$

La búsqueda primero el mejor trata de expandir el nodo más cercano al objetivo, alegando que probablemente conduzca rápidamente a una solución. Así, evalúa los nodos utilizando solamente la función heurística: $f(n) = h(n)$.

Sin embargo este algoritmo sufre los mismos defectos que la búsqueda primero en profundidad (búsqueda no informada), no es óptima, y es incompleta.

A la forma más ampliamente conocida de la búsqueda primero el mejor se le llama búsqueda A*, la cual tiene como objetivo minimizar el costo estimado total de la solución. Evalúa los nodos combinando $g(n)$, el coste para alcanzar el nodo, y $h(n)$, el coste de ir al nodo objetivo (heurística):

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

Ya que la función $g(n)$ nos da el coste del camino desde el nodo inicio al nodo n , y la función $h(n)$ el coste estimado del camino más barato desde n al objetivo, tenemos que:

$$f(n) = \text{coste más barato estimado de la solución a través de } n.$$

Así, si tratamos de encontrar la solución más barata, es razonable intentar primero el nodo con el valor más bajo de $g(n) + h(n)$. Resulta que esta estrategia es más que razonable: con tal de que la función heurística $h(n)$ satisfaga ciertas condiciones, la búsqueda A* es tanto completa como óptima.

Metric-FF utiliza el algoritmo de búsqueda WA*, el cual está basado en los mismos principios que el algoritmo A*, pero en este caso se le añade un peso a cada una de las partes de la función de evaluación: heurística y coste. De modo que se puede dar más importancia a una de las dos partes. La función de evaluación queda expresada de la siguiente manera:

$$f(n) = wg * g(n) + wh * h(n) \tag{3.6}$$

En planificación, típicamente la wg se utiliza con valor 1 y la wh suele variarse para impulsar la búsqueda en mayor o menor medida hacia la solución. Este sesgo con frecuencia compromete la calidad de la solución; a mayor wh , peor calidad. En la 3ra competencia internacional de planificación, IPC 2002, Hoffmann utilizó $wh = 5$ y $wg = 1$ (Turbides, 2009).

Los algoritmos de búsqueda se diseñan para explorar sistemáticamente espacios de búsqueda. Esta forma sistemática se alcanza manteniendo uno o más caminos en memoria y registrando qué alternativas se han explorado en cada punto a lo largo del camino y cuáles no. Cuando se encuentra un objetivo, el camino a ese objetivo también constituye una solución al problema. En muchos problemas, sin embargo,

el camino al objetivo es irrelevante. Si no importa el camino al objetivo, podemos considerar una clase diferente de algoritmos que no se preocupen en absoluto de los caminos. Los algoritmos de búsqueda local funcionan con un sólo estado actual y generalmente se mueve sólo a los vecinos del estado. Típicamente, los caminos seguidos por la búsqueda local no son sistemáticos, tienen dos ventajas claves: (1) usan muy poca memoria (por lo general una cantidad constante) debido a que operan en formulaciones completas de estados, manteniendo sólo un número pequeño de nodos en memoria y (2) pueden encontrar a menudo soluciones razonables en espacios de estados grandes o infinitos (continuos) para los cuales son inadecuados los algoritmos sistemáticos.

Además de encontrar los objetivos, los algoritmos de búsqueda local son útiles para resolver problemas de optimización puros, en los cuales el objetivo es encontrar el mejor estado según una función objetivo.

- **Enforced-hill-climbing:**

Es un algoritmo basado en el algoritmo de búsqueda local **hill-climbing** (ascensión de colinas). Es simplemente un bucle que continuamente se mueve en dirección del valor creciente, es decir cuesta arriba. Termina cuando alcanza un pico en donde ningún vecino tiene un valor más alto. El algoritmo no mantiene un árbol de búsqueda, sino una estructura de datos del nodo actual que necesita sólo el registro del estado y su valor de función objetivo.

El algoritmo EHC fue popularizado por el planificador FF. El algoritmo consiste en hacer de forma iterativa búsquedas en amplitud a partir de un estado s , hasta encontrar un estado s_0 en el árbol que cumpla que $h(s_0) < h(s)$. Cuando este estado es encontrado se reinicia la búsqueda en amplitud a partir de ahí. El proceso se puede entender como la búsqueda progresiva de estados que van mejorando el valor heurístico.

La propiedad avariciosa del EHC resulta interesante, al poder diferenciarse el momento de la generación de nodos del momento de su evaluación. Si en un nivel cualquiera de la búsqueda en amplitud se encuentra un sucesor que mejora la heurística, el resto de sucesores en el mismo nivel no es evaluado, lo que presenta una oportunidad para establecer heurísticas de control adicionales, en las que se determine cuál es el orden en que se deben evaluar los nodos. En problemas con factor de ramificación grande, este orden puede ser determinante. Sin embargo, heurísticas para ordenar las evaluaciones de los nodos no han sido estudiadas en planificación (Turbides, 2009)

Se han inventado muchas variantes de la ascensión de colinas: la ascensión de colinas estocástica, la ascensión de colinas de primera opción, la ascensión de colinas de reinicio aleatorio.

3.5. Implementación: Dominio y Problemas

En esta sección se explicará como fueron modelizados los dominios y problemas de planificación en el presente trabajo. Se presentarán las acciones, tipos de objetos, predicados y funciones utilizadas en la estructura del dominio, además se explicará como fueron obtenidos los problemas de planificación a partir del software SaVoir.

Como se explicó en secciones y subsecciones anteriores la planificación clásica se construye en base a estados

y acciones. El dominio se modela como una entidad que puede estar en diferentes estados y cada estado puede ser modificado realizando acciones. Las reglas que determinan cuales acciones pueden ser realizadas sobre un estado y como estas acciones modifican el estado, se determinan en la definición del dominio. El planificador (Metric-FF) es el encargado de encontrar una secuencia parcialmente ordenadas de acciones que desde un estado inicial y satisfaciendo algunas condiciones alcanza un estado final. Las características del estado inicial y el estado objetivo, como así también métricas para optimizar la solución, son definidas en el problema.

La idea general que se utilizó para el desarrollo del dominio y los problemas en PDDL fue considerar un conjunto de potenciales imágenes a ser adquiridas y se estableció una restricción temporal entre ellas ya que un satélite no puede adquirir imágenes en paralelo con el mismo instrumento. Es decir una imagen j puede ser adquirida después de i si y sólo si $st_j \geq et_i + tt_{i,j}$

Como se mencionó anteriormente el planificador busca la solución en un espacio de estados, utilizando algoritmos de búsquedas; estos algoritmos recorren el espacio de estados como árboles o grafos. Para encontrar soluciones eficientes y rápidas se utilizan técnicas que podan este árbol o guían al algoritmo en su búsqueda. en el cual el planificador busca.

Los posibles conflictos temporales que surgen a la hora de planificar las adquisiciones de imágenes son agrupados por ventanas de tiempo, es decir sabemos que una posible adquisición ubicada en el día uno del horizonte de planificación no tendrá conflicto con una adquisición del día 3. Por esta razón, se decidió dividir el horizonte de planificación (por ejemplo una semana) en horizontes más pequeños de un día, reduciendo de este modo la ramificación en el árbol de búsqueda. Por ejemplo: si una imagen i ya fue seleccionada, luego para añadir una imagen j que no interfiera con i sólo se debe mirar dentro del mismo día de adquisición que i .

3.5.1. Especificación del dominio en PDDL

Para especificar el dominio en PDDL se definieron tipos de objetos, funciones y predicados necesarios para representar el mundo:

- **Requerimientos:** Debido a que en la actualidad existen varias versiones de PDDL y que cada una introduce nuevas características para distintos niveles de expresividad, cada dominio debe definir los “requerimientos” que un planificador debe cumplir para correr el dominio definido.

```
(:requirements :typing :fluents :negative-preconditions :disjunctive-preconditions
    :equality)
```

:typing. Permite nombre de tipos en la declaración de variables

:fluents. Permite funciones matemáticas y operaciones aritméticas en las precondiciones y efectos de la acción y en las descripciones de la meta.

:negative-preconditions. Permite la sentencia “ not ” (negación) en la descripción del estado objetivo.

:disjunctive-preconditions. Permite la sentencia “ or ” en la descripción de la meta.

:equality. Soporta la operación igual (=) incorporada en los predicados.

- Tipos de objetos: Todos los dominios incluyen algunos tipos predefinidos, objetos con los que se operará. Se definieron cinco tipos de objetos:

- `image`: hace referencia a una potencial adquisición, este tipo estará vinculado posteriormente a un modo, área, tiempo de inicio y fin, etc.
- `modoGlobal`: representa el modo de adquisición del sensor con el cual se está trabajando, por ejemplo en el caso de SAR de Radarsat-2 estos modos serían *Standard*, *ScanSAR Narrow*, *Fine*, *Extended Low* entre otros.
- `modo`: indica las variaciones dentro de cada modo general, estas variaciones dependen principalmente del ángulo de incidencia. Por ejemplo dentro del modo general *Wide* tenemos los modos *W1*, *W2*, *W3*.
- `region`: representa un área de interés.
- `dia`: hace referencia al día como horizonte de planificación.

```
(:types
  image - object
  modo - object
  modoGlobal - object
  region - object
  dia - object
)
```

- Predicados: Es una definición abstracta de todas las proposiciones atómicas usadas en el dominio. Seis predicados fueron especificados, `is_selected` determina si una imagen está seleccionada, `empty` es un indicador diario de si alguna imagen fue seleccionada o aún no, el predicado `check` determina si una imagen fue considerada (independientemente si fue o no elegida) para ser agregada a la lista de salida. `same_dia` es verdadero si `?di` y `?dj` son el mismo día, el predicado `ultima` indica la última imagen agregada a la lista de salida, `at` determina si la adquisición de una imagen `?i` es planificada el día `?d`. Por último el predicado `tupla` vincula una imagen con un modo, modo general y región determinada.

```
(:predicates
  (is_selected ?ima - image)
  (empty ?d - dia)
  (check ?j - image)
  (tupla ?i - image ?m - modo ?s - modoGlobal ?r - region)
  (same_dia ?di - dia ?dj - dia)
  (ultima ?i - image)
  (at ?i - image ?d - dia)
)
```

- Funciones: Las funciones (fluents) pueden ser usadas en las precondiciones o efectos de las acciones como si fueran predicados. Estas funciones son principalmente numéricas utilizadas para realizar controles y hacer seguimiento de variables numéricas, como por ejemplo total de área cubierta.

```
(:functions
  (timeStart ?ima - image)
  (timeEnd ?ima - image)
  (area ?i - image)
  (target_in_image ?i)
  (total_area)
  (time_set ?m1 ?m2 - modo)
  (priority_mode ?m - modo)
  (priority_region ?r - region)
  (total_set_time)
  (total_target_in_image)
  (count_images_selected)
  (total_images)
  (total_priority_modes)
  (total_priority_region)
  (mode_max)
  (images_checked)
  (count_images_select)
)
```

- Acciones: Las acciones son el núcleo de la planificación clásica, ya que finalmente son las encargadas de modificar un estado. Para nuestro caso se definieron acciones cubriendo las posibles situaciones que pueden ocurrir.

Hay una acción encargada de seleccionar la primera imagen de la lista de salida que no debe controlar ninguna restricción temporal y las otras acciones seleccionan las imágenes en cadena que satisfagan las restricciones temporales establecidas. A continuación se presentarán los estados considerados.

La imagen 3.12a. y b. muestra dos posibles estados en los cuales ambas imágenes podrían ser adquiridas. Si bien estas situaciones son similares, se debe considerar el orden de las mismas ya que el planificador selecciona el orden las imágenes dependiendo de la función de evaluación. Por ejemplo si a partir de una imagen *i* sólo se evaluarán las imágenes ubicadas más adelante en la línea de tiempo (3.12a.) luego en situaciones del tipo 3.12b. sólo se podría adquirir la imagen **B** y se perdería **A**, por este motivo es necesario observar hacia adelante y atrás sobre el horizonte de planificación.

Las figura 3.13 expone 4 situaciones en las cuales se produce conflicto temporal entre las adquisiciones de

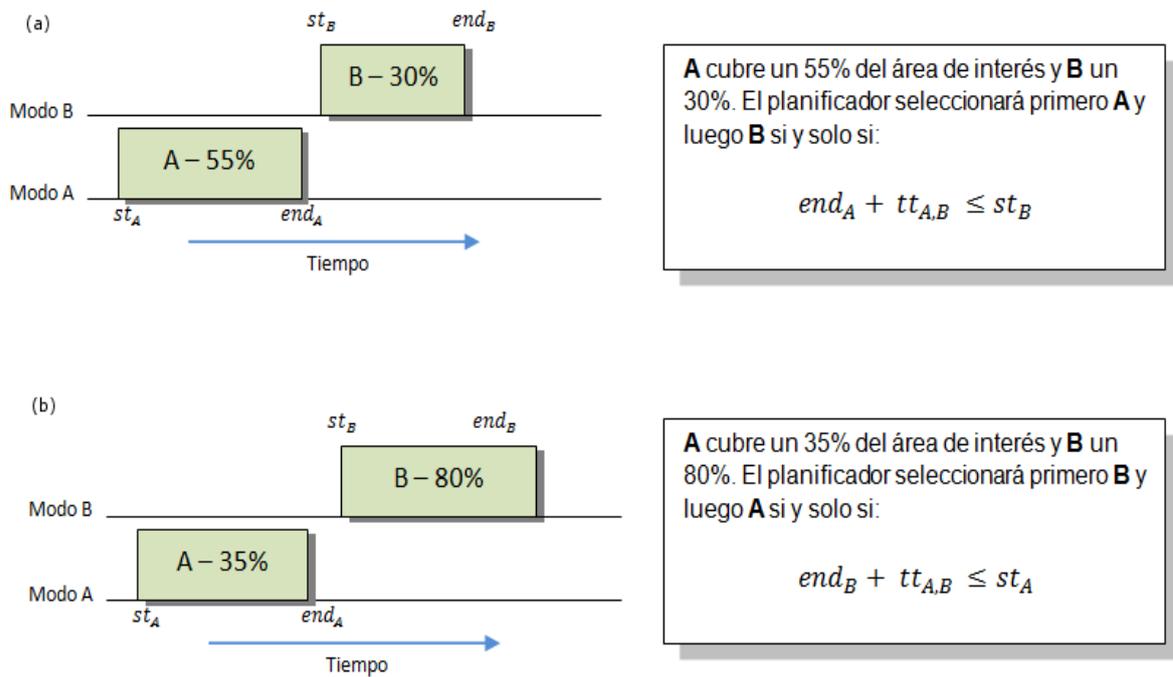


Figura 3.12: Estados posibles para adquirir imágenes satelitales

imágenes.

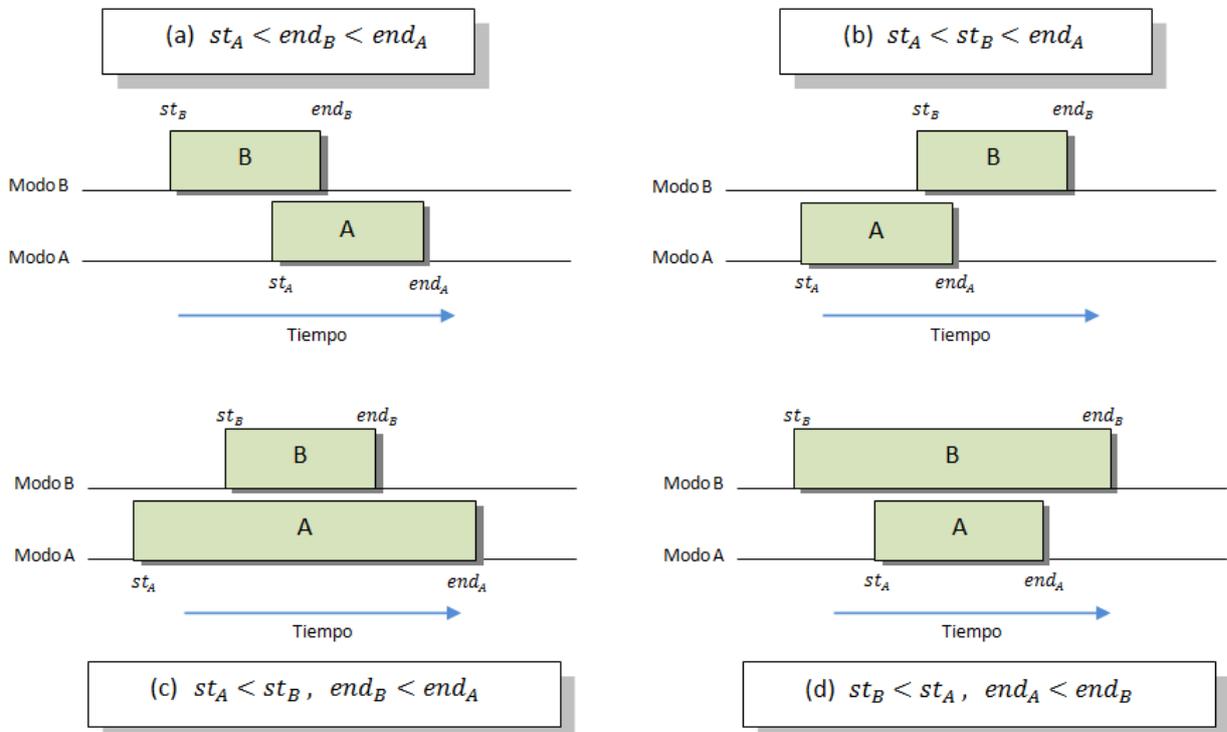


Figura 3.13: Estados donde no es posible adquirir ambas adquisiciones de imágenes

```
(:action tomar_primera_imagen
  ...
)
(:action tomar_siguiete_imagen
  ....
)
```

3.5.2. Especificación del problema en PDDL

Un problema de planificación consta de tres partes importantes. Dos de ellas son obligatorias, la declaración del estado inicial del mundo que se quiere representar y el estado objetivo al cual se desea llegar; la tercera parte importante, aunque no obligatoria, es la definición de métricas para optimizar la solución del planificador. En este caso, el problema es creado a partir del archivo *XML* obtenido como salida del software SaVoi. En él se debe establecer el estado inicial del mundo que queremos representar y el estado objetivo al cual se desea llegar fue creado a partir del archivo *XML* obtenido como salida del software SaVoi.

Como se mencionó en la sección 3.4.2, este software permite exportar los resultados en formato *XML*. *XML* se propone como un estándar para el intercambio de información estructurada entre diferentes plataformas. Actualmente la mayoría de los lenguajes (como Java) cuentan con librerías que permiten leer, escribir y modificar fácilmente un archivo *XML*.

Aprovechando estas facilidades, se desarrollo en lenguaje Java un programa que accediera al archivo de salida de SaVoi y extrajera variables de interés, posteriormente utilizadas en la creación del dominio y problemas de planificación. La imagen 3.14 muestra el visor del SaVoi donde se seleccionó un área de interés y se planifico las pasadas del satélite RADARSAT-2 en dos modos *ScanSAR Narrow* y *Standard* donde a su vez cada uno de estos modos tienen variaciones de acuerdo al ángulo de incidencia o polarización. Esta imagen es acompañada de un segmento del archivo de salida (*XML*) obtenido para este escenario (fig 3.15) donde se resaltan las variables extraídas.

En el problema de planificación generado a partir de un escenario, es decir a partir del archivo *XML* se instanciarón los objetos de los tipos determinados en el dominio. Por lo tanto tendremos un objeto *gr_image* inicialmente vacío, tantos objetos del tipo *modo* como se hayan seleccionado en el escenario y tantas imágenes establecidas por SaVoi, como potenciales tomas planificadas dentro de una ventana de tiempo.

Por ejemplo para el escenario mostrado en la imagen 3.14 tendremos los siguientes objetos:

```
(:objects SCNB_POLY_S24_W60_0 - image
  S2_POLY_S24_W60_0 - image
  S4_POLY_S24_W60_0 - image
  S6_POLY_S24_W60_0 - image
  SCNB - modo
  S2 - modo
  S4 - modo
```

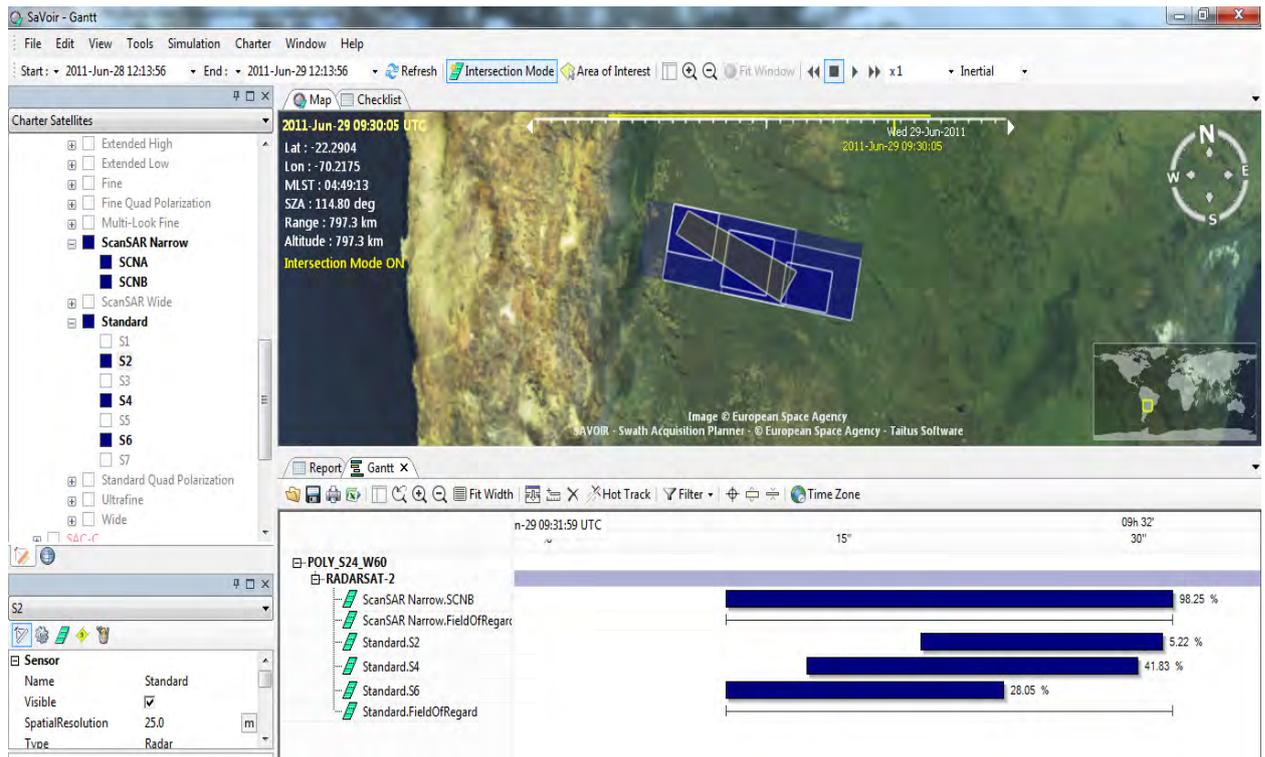


Figura 3.14: Vista de la planificación para un escenario establecido

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>
<GanttX>

  <ValidFrom>2011-06-28T12:13:55</ValidFrom>

  <ValidTo>2011-06-29T12:13:54</ValidTo>

  <Category0>Region</Category0>

  <Category1>Antenna;Satellite;Satellite1;Satellite2</Category1>

  <Tasks>
    <Task id="SCNB.POLY_S24_W60.0">
      <Type>ScanSAR Narrow.SCNB</Type>
      <End>2011-06-29T09:32:31.804667Z</End>
      <Start>2011-06-29T09:32:08.988695Z</Start>
      <Caption>98.25 %</Caption>
      <Parameters>
        <Region>POLY_S24_W60</Region>
        <AreaCovered>98.25 %</AreaCovered>
        <TargetInImage>38.38 %</TargetInImage>
        <Min_Incid>30.6000</Min_Incid>
        <Max_Incid>46.5000</Max_Incid>
        <Orbit>18476</Orbit>
        <Cycle>53</Cycle>
        <RelOrb>297.568949</RelOrb>
        <Track>0</Track>
        <Frame_Start>0</Frame_Start>
        <Frame_End>0</Frame_End>
        <Satellite>RADARSAT-2</Satellite>
        <OrbName>Two Line Elements</OrbName>
        <Sensor>ScanSAR Narrow</Sensor>
        <SensorMode>SCNB</SensorMode>
        <Pass>Descending</Pass>
      </Parameters>
    </Task>
  </Tasks>
</GanttX>
  
```

Figura 3.15: Archivo XML y variables de salidas

```
S6 - modo
Standard - modoGlobal
ScanSAR - modoGlobal
POLY_S24_W60 - region
dia1 - dia
)
```

En el estado inicial del problema se predefinieron los valores numéricos (fluents) definidos en la sección :functions del dominio, como por ejemplo área cubierta por una imagen, porcentaje utilizado de una imagen, prioridad de los modos, imágenes seleccionadas (igual a 0), etc.

Una imagen puede estar en dos estados, seleccionada y/o verificada, es decir todas las imágenes son controladas, sólo un subconjunto posiblemente será seleccionado. Por lo tanto nuestro objetivo es que todas las imágenes sean revisadas.

El planificador Metric-FF (como su nombre lo indica) soporta el uso de métricas lo que nos permite optimizar la solución. Por ejemplo, podemos seleccionar un grupo de imágenes priorizando el total de área cubierta, en ese caso en la definición del problema se debe escribir lo siguiente:

```
(:metric minimize (total_area))
```

3.6. Pruebas y Resultados

En esta sección se presentarán distintos escenarios, serán escenarios simples que nos permitan analizar en detalle el comportamiento del planificador frente a distintas situaciones dependiendo de las métricas establecidas. Para realizar las pruebas y evaluaciones se utilizará como área de interés la cuenca del río Bermejo.

A lo largo de las diferentes pruebas realizadas se irá complejizando el dominio y el problema de planificación satisfaciendo distintas necesidades que surgen.

3.6.1. Evaluar la salida dependiendo del total de área cubierta

Para este caso se eligieron los modos *Fine* y *Extended High* sobre la cuenca baja del río Bermejo. Cada modo a su vez ofrece variaciones dependiendo del ángulo de incidencia, por lo tanto para el modo *Extended High* tenemos un total de 6 posibilidades y para *Fine* tenemos 26 posibilidades. En este escenario, se eligieron 3 modos EH2, EH4, EH6 de *Extended High* y 1 modo F6N de *Fine* con las siguientes características:

- EH2: Ángulo de incidencia: (50°- 53.4°)
- EH4: Ángulo de incidencia: (54.1°- 56.8°)
- EH6: Ángulo de incidencia: (56.8°- 59.3°)
- F6N: Ángulo de incidencia: (46.3°- 48.7°)

Para ver más información sobre los modos de adquisiciones y las variaciones en el ángulo de incidencia consultar el Anexo.

Se planificó para un período de ventana de cuatro días (desde el 7 de julio a 10 de julio de 2011), obteniendo un total de 8 posibles adquisiciones de imágenes, cuatro el día 7/7 y cuatro el día 10/7 (imagen 3.16). Para este escenario, se supuso igual prioridad para los modos de adquisiciones (`priority_mode ?m - modo`) y un tiempo de configuración entre modos constante (`time_set ?m1 ?m2 - modo`). En este caso, estos valores no influirán en el costo para alcanzar un nodo en el árbol de búsqueda, ya que solamente estamos evaluando el área cubierta por cada adquisición.

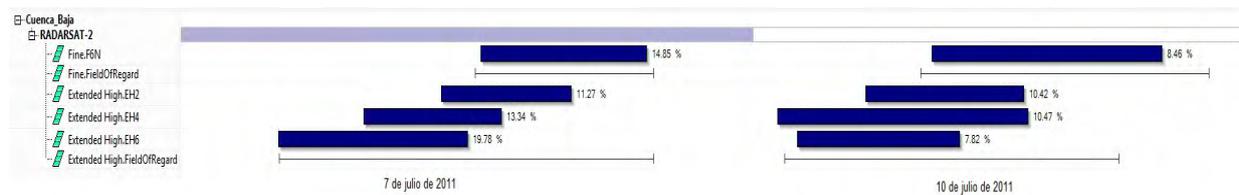


Figura 3.16: Vista de la planificación para el escenario establecido

El problema de planificación en PDDL se obtuvo desde el archivo *XML* extraído desde SaVoir (a través de una interfaz desarrollada en Java). En este archivo se estableció la métrica utilizada, el estado inicial que corresponde a las posibles adquisiciones de imágenes con sus respectivas variables y el estado objetivo que se desea alcanzar:

```
(:metric minimize (total_area) )
(:goal ( = (images_checked) (total_images) ))
```

El planificador recorrió 48 estados en 0.47 segundos, y obtuvo una salida donde se eligieron 3 imágenes de las 8 posibles. El área total cubierta por las tres imágenes es el máximo posible. La salida gráfica es expuesta en la figura 3.17, la cual fue obtenida a través de un proceso Java que lee la salida del planificador (archivo plano) y lo convierte a un archivo *XML* para poder ser visualizada en SaVoir.



Figura 3.17: Solución encontrada por el planificador evaluada por el total de área cubierta

3.6.2. Evaluar la salida dependiendo del modo de adquisición

Continuando con el mismo escenario presentado en la sección anterior, se podría pensar ahora que ante un tipo determinado de emergencia el total de área cubierta ya no es relevante pero si el modo de adquisición.

De este modo, cada modo tiene asociado una prioridad, donde valores bajos indican prioridad alta.

En este caso se evaluará la salida del planificador dependiendo del modo de adquisición, por lo tanto se establece la siguiente la métrica:

```
(:metric minimize (total_priority_modes))
```

La variable `total_priority_modes` fue calculada como se mencionó en la sección 3.3.3, es decir se intenta minimizar la sumatoria de todas las prioridades de los modos en función de la prioridad más baja (`mode_max`).

```
(increase (total_priority_modes) (/ (priority_mode ?mj) (mode_max)))
```

Para este caso de prueba se establecieron los siguientes valores en PDDL, donde el modo EH2 tiene mayor prioridad:

```
( = (priority_mode mF6N) 2)
( = (priority_mode mEH2) 1)
( = (priority_mode mEH4) 2)
( = (priority_mode mEH6) 2)
```

El planificador en esta prueba recorrió 52 estados en 0.62 segundos, y obtuvo una salida donde se eligieron (a diferencia de las 3 en la sección anterior) 2 imágenes de las 8 posibles. Como el modo EH2 interfiere con los demás modos y tiene la prioridad más alta, sólo se pueden adquirir imágenes de este tipo.

La imagen 3.18 muestra la salida gráfica obtenida.

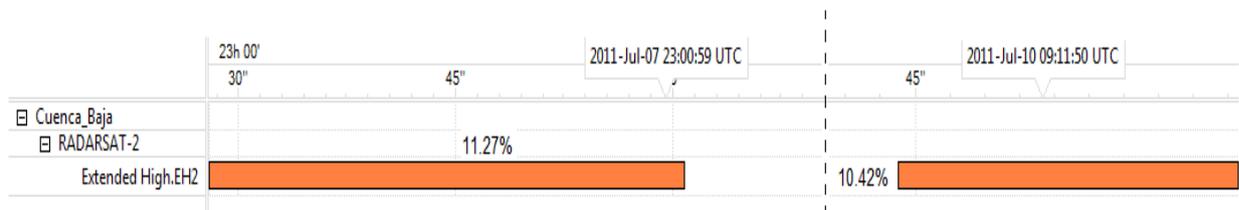


Figura 3.18: Solución encontrada por el planificador evaluada con respecto al modo de adquisición con mayor prioridad

También se podría establecer una función lineal como métrica, combinando criterios de optimización. En este escenario se combinó el área total cubierta y la prioridad de los modos de adquisición de la siguiente manera:

```
(:metric minimize ( + (* 1 (total_area)) (* 1 (total_priority_modes))))
```

Las constantes de valor 1, podrían modificarse para determinar cuál métrica domina sobre la otra, por ejemplo si se prioriza el área total cubierta sobre los modos de adquisición se podría establecer constantes de 1 y 0.5 respectivamente.

La salida obtenida para la métrica establecida se muestra en la figura 3.19. Puede verse que la respuesta del planificador para este escenario es una combinación de las dos realizadas anteriormente. El planificador

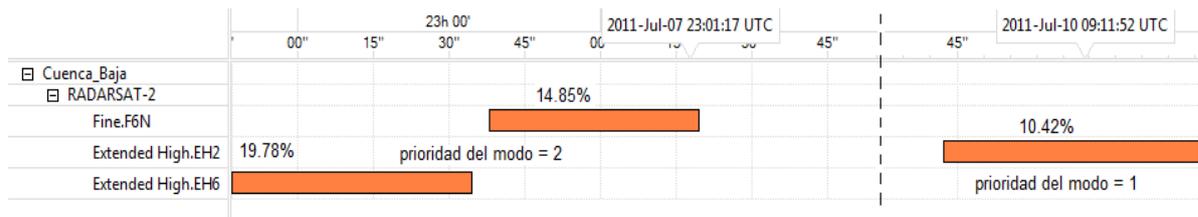


Figura 3.19: Solución evaluada por criterios de optimización combinados: área total cubierta y prioridad del modo de adquisición

recorrió 48 estados en 0.47 segundos y seleccionó 3 imágenes de las 8 totales evaluadas por el área que cubren y su modo de adquisición.

En el primer día de planificación (7 de julio) prevalece el área total cubierta sobre la prioridad del modo EH2 (igual que en la primera prueba realizada). Sin embargo en el cuarto día de planificación (10 de julio) la situación cambia, en la primera prueba se había seleccionado la imagen con modo EH4 con un 10.47 % del área cubierta, pero con esta nueva métrica se selecciona la imagen con modo EH2, que tiene mayor prioridad que EH4 pero cubre un porcentaje (10.42 %) apenas inferior que esta.

Este es un claro ejemplo de como trabaja el planificador con criterio de optimización combinados.

3.6.3. Evaluar la salida dependiendo del porcentaje del *swath* que cubre el área de interés

Se podría evaluar un criterio de optimización donde el interés principal se centre en aprovechar al máximo el sensor y no en monitorear precisamente un área. Esta situación está vinculada a la idea de satisfacer, en una pasada del satélite, varios pedidos de usuarios y no a un caso de emergencia particular.

En esta sección se establecerá una métrica con la variable (`total_target_in_image`) de la siguiente forma:

```
(:metric minimize (total_target_in_image) )
```

Esta variable fue calculada de un modo similar al porcentaje de área cubierta por una imagen. Debido a que la métrica minimiza la función objetivo, la variable se calculó como el 100 % menos el porcentaje del *swath* que cubre el área de interés, de este modo para minimizar la variable (`total_target_in_image`) se debe maximizar (`target_in_image ?i - image`), provocando el resultado deseado.

```
(increase (total_target_in_image) ( - 100 (target_in_image ?i)))
```

En este escenario el planificador recorrió 48 estados en 0.31 segundos y seleccionó 3 imágenes de las 8 totales. Si bien estas 3 imágenes son las mismas que en la sección anterior utilizando una métrica combinada, es importante destacar en el modo en que el planificador operó. Como la selección de imágenes es independiente por día, el planificador es libre de seleccionar primero una imagen de un día en particular, que no necesariamente es el primer día en el horizonte de planificación.

Un ejemplo de esto es la comparación entre el plan obtenido en la prueba anterior y en esta prueba. Las primeras tres acciones realizadas por el planificador en los dos escenarios son expuestas en la figura 3.20.

```

(:metric minimize ( + (* 1 (total_area)) (* 1 (total_priority_modes)))) (a)
0: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IEH6_CUENCA_BAJA_0 MEH6 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_BAJA D2011_6_7 ) [1]
1: (TOMAR_SIG_IMAGEN_DIA_2 IEH6_CUENCA_BAJA_0 MEH6 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_BAJA D2011_6_7
   IF6N_CUENCA_BAJA_0_0 MF6N MFINE RCUENCA_BAJA D2011_6_7 ) [1]
2: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IEH2_CUENCA_BAJA_0 MEH2 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_BAJA D2011_6_10 ) [1]

(:metric minimize (total_target_in_image)) (b)
0: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IEH2_CUENCA_BAJA_0 MEH2 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_BAJA D2011_6_10 ) [1]
1: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IF6N_CUENCA_BAJA_0_0 MF6N MFINE RCUENCA_BAJA D2011_6_7 ) [1]
2: (TOMAR_SIG_IMAGEN_DIA_1 IF6N_CUENCA_BAJA_0_0 MF6N MFINE RCUENCA_BAJA D2011_6_7
   IEH6_CUENCA_BAJA_0 MEH6 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_BAJA D2011_6_7 ) [1]

```

Figura 3.20: Comparación de distintos planes dependiendo de la métrica establecida

En estos planes puede identificarse la diferencia en el orden de la selección de imágenes. Esto se debe a que la imagen del modo EH2 del cuarto día de planificación (10 de julio) es utilizada en un 85.06 %, es decir el sensor en este modo es aprovechado casi en su totalidad.

Debido al comportamiento del algoritmo de búsqueda con respecto a la función de evaluación, que determina cuándo un estado no objetivo es más prometedor que otro, el planificador se asegura la adquisición de esta imagen EH2 antes que cualquier otra.

La imagen 3.21 muestra la salida gráfica del planificador para este escenario. Los porcentajes indicados corresponden al porcentaje del *swath* que cubre el área de interés.

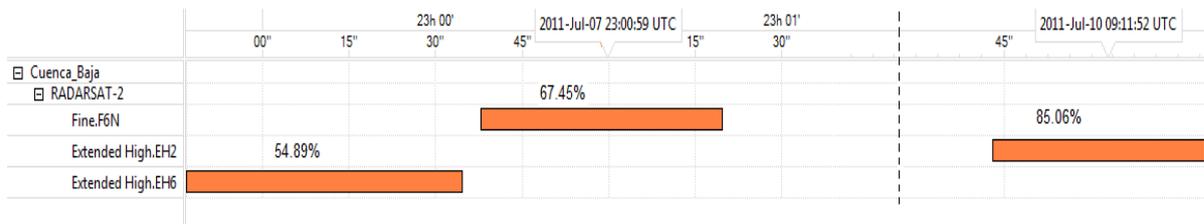


Figura 3.21: Solución evaluada respecto al porcentaje del *swath* que cubre el área de interés

La tabla 3.2 expone los valores de la variable (*target_in_image ?i*) de todas las potenciales adquisiciones para comprobar la correcta elección realizada por el planificador. Las celdas coloreadas corresponden a las imágenes seleccionadas.

3.6.4. Evaluar la salida dependiendo de la prioridad de la región

En la realidad en general ante un evento de emergencia dado existen varias zonas de interés a monitorear con distintos niveles de riesgo y prioridades. Por lo tanto se podría direccionar la salida del planificador para monitorear primero las áreas con mayor riesgo.

Cada región tiene asociada una prioridad (*priority_region ?r*) donde los valores chicos indican prioridad

Modos de adquisición	7 de Julio	10 de Julio
<i>F6N - Fine</i>	67.45%	75.69%
<i>EH2 - Extended High</i>	40.93%	85.06%
<i>EH4 - Extended High</i>	51.19%	60.82%
<i>EH6 - Extended High</i>	54.89%	69.41%

Tabla 3.2: Valores de `(target_in_image ?i)` de todas las posibles adquisiciones

grande, es decir el 1 india máxima prioridad. Para este escenario no sólo se considera la prioridad de la región (como en el caso de los modos de adquisición) sino que se pondera con el porcentaje de área cubierta por una imagen en esa región.

Por lo tanto la solución del planificador se evalúa minimizando la variable `(total_priority_region)` calculada del siguiente modo:

```
(increase (total_priority_region) ( * (priority_region ?r) ( - 100 (area ?i) )))
```

Y la métrica establecida es:

```
(:metric minimize (total_priority_region))
```

A continuación se presenta el escenario creado para esta prueba. Se sigue trabajando con los mismos modos de adquisición *Extended High* con sus variaciones EH2, EH4, EH6 y F6N de *Fine*, donde todos tienen la misma prioridad y el mismo horizonte de planificación (desde 7 de julio al 10 de julio). Se trabajó con 3 regiones en total; a la Cuenca Baja del río Bermejo se sumó la Cuenca Media y la Cuenca Alta. A diferencia de las pruebas anteriores donde sólo se tenía adquisiciones el día 7 de julio y 10 de julio sobre la Cuenca Baja, se agregaron adquisiciones el día 9 de julio sobre la región de la Cuenca Media y Alta. Se planificaron un total de 12 adquisiciones posibles sobre las tres regiones en un período de 4 días.

La imagen 3.22 muestra las regiones consideradas con sus nombres y valores de prioridad. En este caso se determinaron las siguientes prioridades que, probablemente no se ajustan a la realidad pero, hacen la resolución del planificador más interesante.

```
( = (priority_region rCUENCA_BAJA) 1)
( = (priority_region rCUENCA_MEDIA) 2)
( = (priority_region rCUENCA_ALTA) 3)
```

La figura 3.23 expone el diagrama de Gantt con las variables y valores que conformarán la entrada del planificador.

El planificador seleccionó, de acuerdo a la métrica establecida, 4 de las 12 imágenes totales recorriendo 2976 estados en 2.96 segundos. Se seleccionaron dos imágenes el día 7 de julio, una el 9 de julio y una 10 de julio.

El día 7 de julio, primero se seleccionó la imagen del modo F6N sobre el área de la Cuenca Alta (con prioridad más alta) cubriendo un porcentaje igual a 12.69 % sobre esta región. Luego, como las restricciones temporales

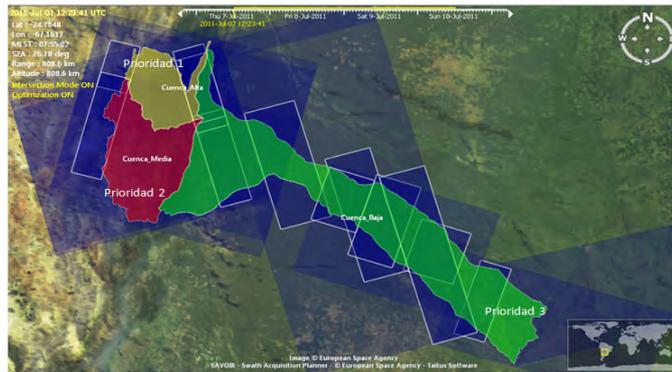


Figura 3.22: Regiones de interés con distintos niveles de prioridad

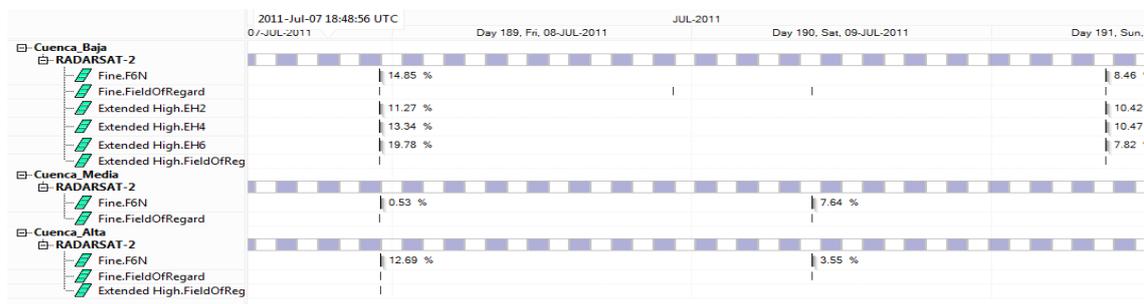


Figura 3.23: Diagrama de Gantt: posibles adquisiciones planificadas sobre las regiones de interés

lo permitieron se seleccionó otra imagen el mismo día de planificación del modo EH6 con un porcentaje de área cubierta igual a 19.78% sobre la región de la Cuenca Baja del río Bermejo, este modo es el que mayor porcentaje de la región cubre. El tercer día de planificación (9 de julio) sólo existían dos posibles adquisiciones: una sobre la región de Cuenca Media con un porcentaje de cobertura igual a 7.64% y otra sobre la región de Cuenca Alta con una cobertura de 3.55%, ambas son del modo F6N. Si bien la primera cubre mayor parte de su área, el planificador selecciona la segunda imagen ya que la región Cuenca Alta tiene mayor prioridad.

En el tercer día de planificación, como sólo son posibles adquisiciones sobre la zona baja de la cuenca, el planificador selecciona sólo con el criterio de mayor cobertura. En la imagen 3.24 muestra el diagrama de Gantt de salida obtenido. En la figura 3.25 pueden verse las 4 adquisiciones seleccionadas ubicadas geográficamente en las regiones de interés.

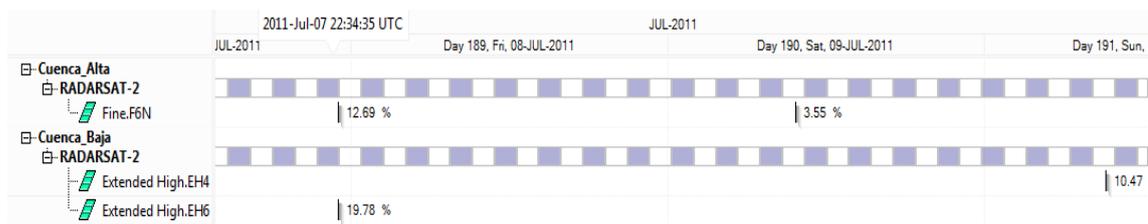


Figura 3.24: Diagrama de Gantt: imágenes seleccionadas evaluadas por las prioridades de las regiones

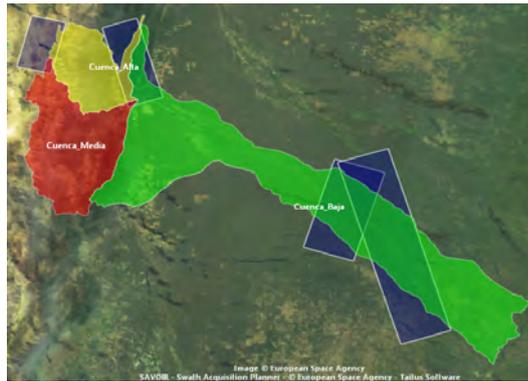


Figura 3.25: Mapa con las adquisiciones seleccionadas sobre las regiones de interés

3.6.5. Extensión del dominio a nuevos sensores y satélites

Este escenario expone la flexibilidad que brindan las técnicas de planificación para incorporar al problema nuevos satélites y sensores. Los escenarios en las secciones anteriores, consideraban un sólo sensor SAR del satélite Radarsat-2 y la elección de imágenes se realizaba entre los diferentes modos brindados por este instrumento de observación, siendo mutuamente excluyentes en el tiempo.

En esta sección se presenta un nuevo escenario donde se suma el satélite ALOS. El satélite ALOS fue lanzado en el año 2006 por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA). Está compuesto de 3 sistemas independientes (PRISM, AVNIR-2, PALSAR) que adquieren simultáneamente imágenes ópticas e imágenes de radar con diversas resoluciones y coberturas.

- PRISM es un sensor pancromático compuesto de 3 telescopios delantero/nadir/trasero y genera imágenes con una resolución de 2.5m. El instrumento PRISM dispone de varias modalidades de adquisición:
 - Modalidad OB1, modalidad triplet: adquisiciones delantera, al nadir y trasera para escenas de 35 Km de corredor.
 - Modalidad OB2 y Modalidad OB3 para adquisiciones de 70 Km de corredor.
- AVNIR-2 es un sensor multiespectral de 4 bandas dotado de una capacidad de puntería de $\pm 44^\circ$ que permite una revisita de 2 días con una resolución de 10 m.
- PALSAR es un Radar de Síntesis de Apertura (SAR en inglés), banda L (igual al satélite SAOCOM) capaz de adquirir datos de hasta 10 m de resolución con ángulos de incidencia entre 20° y 55° . Para las adquisiciones en modo rutina se activan alternativamente por defecto cuatro modalidades expuestas en la tabla 3.3.

Agregando el satélite ALOS, sumamos al problema de planificación 3 sensores más, los cuales pueden adquirir imágenes en paralelo, por lo tanto esto amplía el espacio de potenciales adquisiciones. En este caso las restricciones temporales deben controlarse entre modos o sensores cuyas adquisiciones no pueden ocurrir simultáneamente.

Modalidad PALSAR	Resolución	Polarización	Corredor
FBS Fine Resolución	10m	Single HH	70Km
FBD Fine Resolución	20m	Dual HH+HV	70Km
SL Scan SAR	100m	Single HH	350Km
P Fine Polarimetría	30m	HH+HV+VH+VV	30Km

Tabla 3.3: Modos de adquisición del sensor PALSAR del satélite ALOS

Para la implementación de este escenario se modificó ligeramente el dominio PDDL. Se agregó el tipo `sensor - object` utilizado para identificar los sensores de los satélites y el predicado (`same_sensor ?sei - sensor ?sej - sensor`) cuya funcionalidad es determinar si dos sensores puede adquirir imágenes en paralelo. Es decir, es utilizado para controlar las restricciones temporales entre adquisiciones mutuamente excluyentes, en el caso de que dos sensores A y B no puedan trabajar en paralelo, el predicado (`same_sensor A B`) será verdadero.

Además se modificaron los predicados (`empty ?d - dia ?s - sensor`) y (`tupla ?i - image ?m - modo ?s - modoGlobal ?r - region ?se - sensor`). Se podría expresar la idea de la planificación como una tabla, donde en la primera fila se ubican los días de planificación y en la primer columna los sensores que son independientes, luego cada celda es una combinación de sensor - día y la competencia de adquisición se realiza dentro de cada celda.

Se trabajó con modos e instrumentos de ambos satélites cuya resolución espacial fuese similar, a continuación se listan los modos seleccionados y sus características:

- Satélite ALOS:
 - AVNIR-2 (sensor multiespectral) con una resolución de 10m
 - PALSAR (Radar de Síntesis de Apertura) un modo *Fine*
- Satélite Radarsat-2 (sensor SAR):
 - modo *Multi-Look Fine* con una resolución de 8mx8m
 - modo *Fine Quad-Pol* con una resolución de 12mx8m (rango x azimut)

Se eligieron dos variaciones dentro de cada modo *Multi-Look Fine*, *Fine Quad-Pol* y PALSAR. El horizonte de planificación es de cuatro días (desde el 18 al 22 de julio de 2011) y se planificó un total de 18 potenciales adquisiciones. La figura 3.26 muestra el diagrama de Gantt para el horizonte de planificación y los modos seleccionados.

El planificador encontró una solución en 22.15 segundos y recorrió 867 estados. Esta solución fue evaluada según el área total cubierta por cada imagen. Se seleccionaron 9 imágenes en total.

El primer día de planificación sólo hay 4 adquisiciones del sensor Radarsat-2 (en distintos modos), de las cuales sólo se puede acceder a una. En la figura 3.27 se expone la planificación para el día 18 de julio.

A partir de un análisis visual, puede observarse que la adquisición en modo F1 cubre mayor porcentaje de área (13.16 %) que los otros modos. El planificador, conducido por la función de evaluación, selecciona

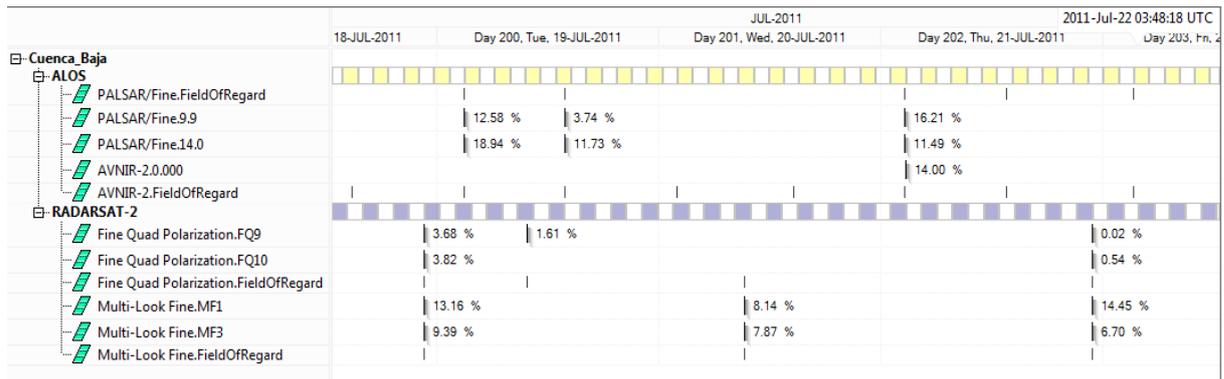


Figura 3.26: Diagrama de Gantt: Planificación de potenciales adquisiciones combinando satélites, sensores y modos

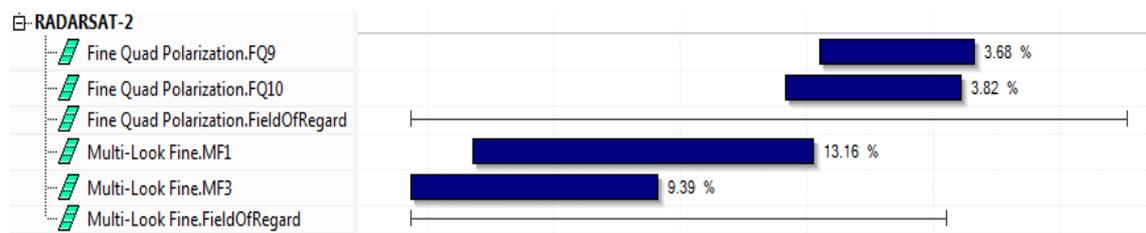


Figura 3.27: Adquisiciones de Radarsat-2 en el primer día de planificación

esta adquisición seguida de la adquisición de modo FQ9 (3.68%). Cabe destacar que para este escenario se estableció un tiempo de configuración igual a 1 segundo, entre dos modos de adquisición distintos:

```
( = (time_set mMF1 mFQ9) 1)
```

La adquisición de F1 finaliza a la hora 22:39:45 y FQ9 inicia a la hora 22:39:46 (diferencia de 1 segundo). El resultado del planificador sería distinto si se estableciera un tiempo de configuración entre los modos de adquisición mayor a 1 segundo. Si esto sucediera, se esperaría que el planificador en lugar de seleccionar sólo la imagen en modo F1, sea capaz de seleccionar inicialmente el modo F3 (el cual cubre un porcentaje del área igual 9.39%) seguida de la adquisición de modo FQ10 (3.82%). De este modo la suma de porcentaje de área cubierta total de FQ10 y F3 sería superior al porcentaje de sólo F1 ($13.16\% < 9.39\% + 3.82\%$) (ver sección 3.6.7).

Las figura 3.28 expone las imágenes seleccionadas por el planificador organizadas por modo de adquisición y agrupadas por día.

Puede observarse que si bien las adquisiciones del día 21 de julio se intersecan, esto no es un problema porque el satélite ALOS puede adquirir imágenes simultáneamente con el sensor PALSAR y AVNIR-2

En el mapa de la figura 3.29 se muestra la ubicación geográfica sobre la zona de interés de las adquisiciones seleccionadas, donde el color amarillo corresponde a las adquisiciones del satélite ALOS y el azul al satélite Radarsat-2.

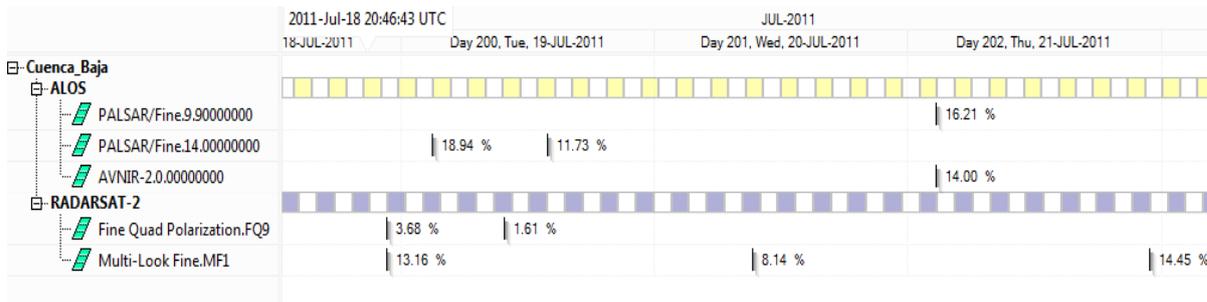


Figura 3.28: Adquisiciones seleccionadas organizadas por modo de adquisición y agrupadas por día

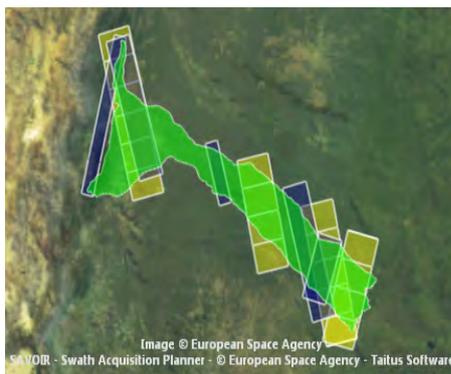


Figura 3.29: Mapa con las adquisiciones seleccionadas sobre la Cuenca Baja del río Bermejo

3.6.6. Evaluar la salida dependiendo de la longitud del plan

En esta sección se mide la calidad de la solución con respecto al número de imágenes seleccionadas. Como se mencionó en la sección 3.3.3 este es un importante parámetro de calidad para el plan debido a que el satélite debe contar con una capacidad suficiente a bordo para almacenar cada imagen, además se requiere de tiempo para descargarlas desde el satélite, y de recursos terrenos suficientes para su posterior procesamiento.

Otro motivo por el cual es importante establecer este criterio es limitar el número de imágenes a ser adquiridas, ya sea por ejemplo por el alto costo que tiene cada imagen o por ejemplo en el caso de emergencias y la activación de la Carta Internacional “Espacio y Grandes Catástrofes”, existe un límite máximo de imágenes solicitadas establecido por cada agencia miembro.

Continuando con el escenario anterior se podría establecer un corte en el número de imágenes a seleccionar, por ejemplo elegir sólo una imagen por día o un cierto número en total independiente del día.

Si se desea seleccionar un número N de adquisiciones, evaluadas según una métrica establecida, sólo basta acotar la variable `(count_images_select)`. En este caso la solución encontrada por el planificador será la mejor evaluada según la función de evaluación independientemente del día de planificación.

El estado final, se ve ligeramente modificado de la siguiente manera:

```
(:goal ( = (count_images_select) N))
```

Supongamos se quiere adquirir sólo 6 imágenes y evaluamos la selección según el área total cubierta, por lo

tanto definimos la métrica como:

```
(:metric minimize (total_area) )
```

El planificador encontró una solución en 19.19 segundos recorriendo 95 estados. Se puede observar que limitando el número total de imágenes el planificador recorre menos estados y encuentra una solución más rápido que en el caso donde no se establece esta restricción. Como la métrica establecida es el porcentaje total de área cubierta, las 6 imágenes seleccionadas son aquellas que cubren mayor área, independientemente del día de planificación.

La salida obtenida es expuesta en la imagen 3.30, en color azul se determina la adquisición del satélite Radarsat-2 con el modo MF1-Fine del sensor SAR y el color amarillo identifica las adquisiciones del satélite ALOS, con los sensores PALSAR y AVNIR-2.

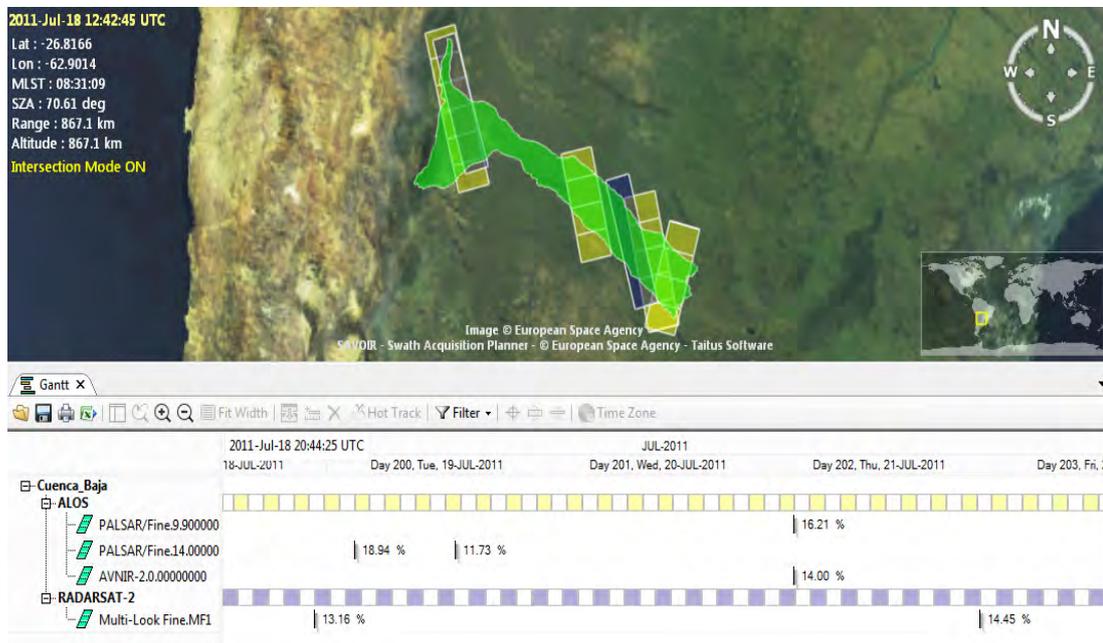


Figura 3.30: Mapa con las 5 adquisiciones seleccionadas sobre la Cuenca Baja del río Bermejo y su diagrama de Gantt

Por otro lado se podría establecer una restricción respecto a la cantidad de imágenes adquiridas por día. Por ejemplo, limitar la solución del planificador a una adquisición de una imagen por día. Para esto se agregó al dominio la variable `(total_x_dia ?d - dia)` que cuenta las imágenes adquiridas por día y se modificó el estado `goal` de la siguiente manera:

```
(:goal (and ( = (total_x_dia d2011_6_18) 1)
            ( = (total_x_dia d2011_6_19) 1)
            ( = (total_x_dia d2011_6_20) 1)
            ( = (total_x_dia d2011_6_21) 1)
            )
)
```

En este caso, el planificador encontró una solución en 16.38 segundos y recorrió 64 estados. Se seleccionaron 4 imágenes (una por día), dos del satélite ALOS y dos del satélite Radarsat-2. Las imágenes elegidas son aquellas que mayor porcentaje de área cubren en el día de planificación. A diferencia de la prueba anterior (donde no había límite de adquisiciones por día)

El resultado es expuesto en la figura 3.31.

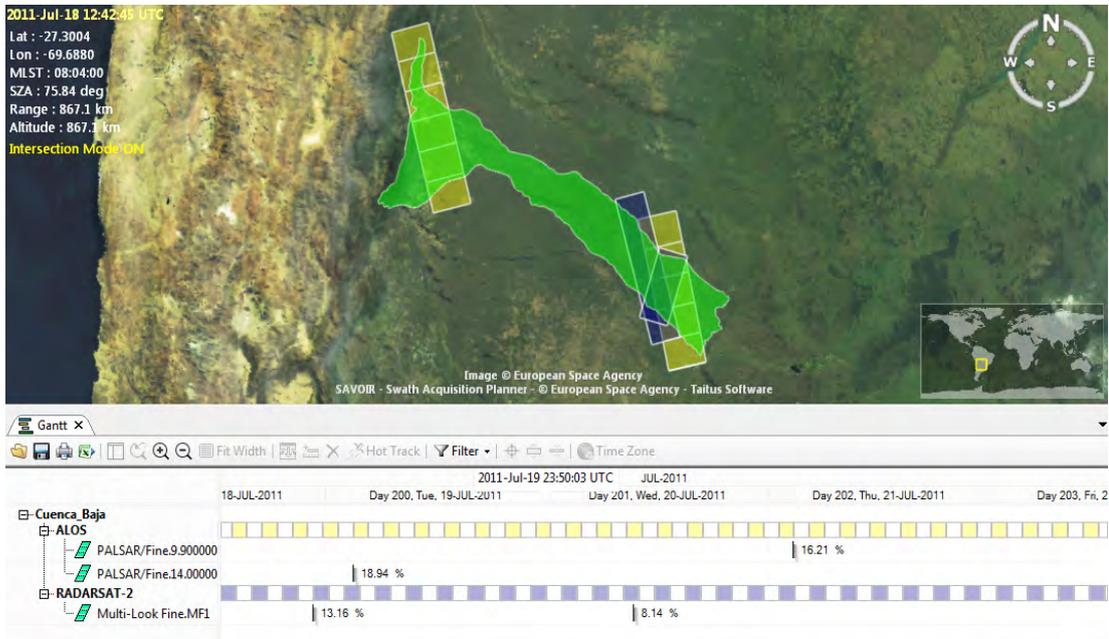


Figura 3.31: Mapa con las 4 adquisiciones seleccionadas sobre la Cuenca Baja del río Bermejo y su diagrama de Gantt

De igual modo pueden obtenerse resultados combinados entre el total de imágenes adquiridas y las restricciones diarias. Por ejemplo se podría establecer un total de 5 imágenes, limitadas a una sola adquisición el día 19 de Julio. El estado *goal* se escribiría de la siguiente manera:

```
(:goal (and ( = (count_images_select) 5)
            ( = (total_x_dia d2011_6_19) 1)
          )
)
```

3.6.7. Ampliación de dominio: unión de adquisiciones

Durante las evaluaciones experimentales realizadas se presentó un caso particular en el cual el planificador no se comportaba de la manera deseada. Cabe recordar que los planificadores buscan una sucesión de acciones que desde un estado inicial y cumpliendo una serie de restricciones temporales y físicas lleguen a un estado final. Estas acciones conforman la solución del problema de planificación, que aún estableciendo métricas, en algunos casos no es la mejor solución posible.

El planificador busca la solución en un espacio de estados, este espacio de estados está determinado por las acciones definidas en la teoría de dominio, el modo en el cual el planificador busca en ese espacio influye en la

solución que encontrará. Esta búsqueda está determinada en parte por la definición de la función de evaluación.

En nuestro caso, por ejemplo si establecemos una métrica que evalúe la salida de acuerdo al área total cubierta, el planificador identificará en su árbol de búsqueda cuál nodo es más prometedor y en este caso seleccionará primero el nodo que cubra mayor porcentaje de área.

Para este escenario de prueba se trabajó sobre la región de la Cuenca Media del río Bermejo, con diferentes modos del instrumento SAR del satélite Radarsat-2. Para este caso se estableció una métrica que evalúe la salida dependiendo el área total cubierta y se ignoró la prioridades de los modos de adquisición y el tiempo de configuración entre ellas.

El intervalo de planificación fue de 5 días (16/8/2011 hasta 20/8/2011) y los modos de adquisición utilizados para esta evaluación experimental fueron:

- EH1 - Extended High: Ángulo de incidencia = (48.5°, 52.1°). Ancho de Swath = 89 km
- EH5 - Extended High: Ángulo de incidencia = (55.5°, 58.1°). Ancho de Swath = 78.75 km
- F4N - Fine: Ángulo de incidencia = (42.7°, 45.3°). Ancho de Swath = 54.22 km
- F3N - Fine: Ángulo de incidencia = (40.7°, 43.5°). Ancho de Swath = 55.77 km
- MF22 - Fine: Ángulo de incidencia = (32.4°, 35.7°). Ancho de Swath = 55.5 km
- MF4 - Fine: Ángulo de incidencia = (43.3°, 45.9°). Ancho de Swath = 55.04 km
- MF6F - Fine: Ángulo de incidencia = (47.5°, 49.9°). Ancho de Swath = 56.65 km

Se planificó un total de 13 imágenes para todos los modos en los 5 días de planificación. La imagen 3.32 muestra el diagrama de Gantt de las potenciales adquisiciones sobre la región de interés. Los porcentajes en el diagrama de Gantt, indican el área cubierta por un imagen determinada.

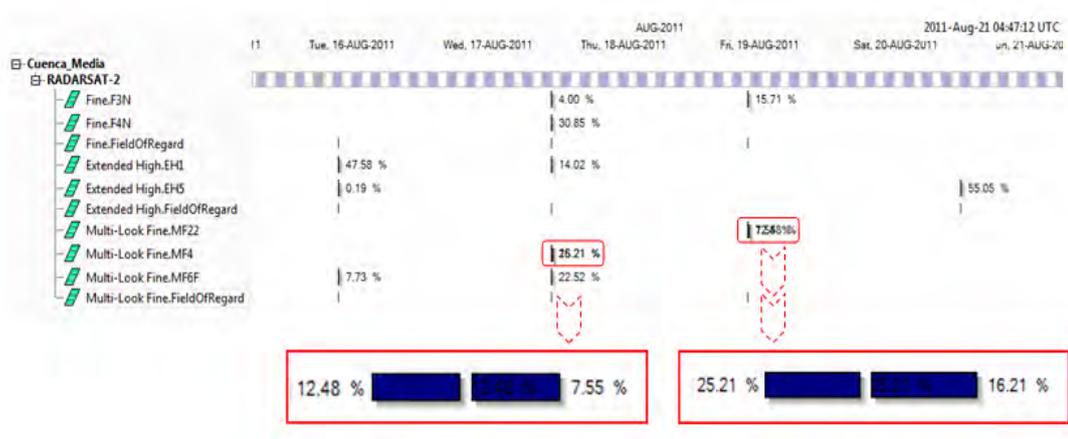


Figura 3.32: Diagrama de Gantt de las potenciales adquisiciones sobre la Cuenca Media del río Bermejo

Este escenario fue seleccionado intencionalmente, ya que presenta situaciones particulares. En la figura 3.32 se muestran con mayor detalle adquisiciones del segundo y cuarto día de planificación (17/08 y 20/08

respectivamente). Lo que se quiere mostrar en estos gráficos que las adquisiciones con mayor cobertura terminan no siendo la mejor solución. En el segundo día de planificación, el modo F4N es el que mayor porcentaje de área cubre, sin embargo si se suman las dos adquisiciones del modo MF4 (25.21 % + 16.21 %), el porcentaje cubierto es superior a 30.85 %. Lo mismo sucede el cuarto día de planificación con el modo F3N y la suma de las dos adquisiciones del modo MF22 (15.71 % + 7.55 %).

En estos caso se esperaba que el planificador (más bien el algoritmo de búsqueda) sea capaz de tomar la decisión correcta. Esto no sucedió así, debido a que el algoritmo *Best-First* guía su búsqueda en el espacio de estados de acuerdo a la función de evaluación, es decir prioriza siempre la adquisición que tiene el mejor valor de evaluación, en este caso esta compuesto por la función heurística y el total de área cubierta.

La imagen 3.33 muestra el plan obtenido para este caso de prueba. El planificador seleccionó 4 imágenes de las 13 totales, recorriendo 92 estados en 2.65 segundos.

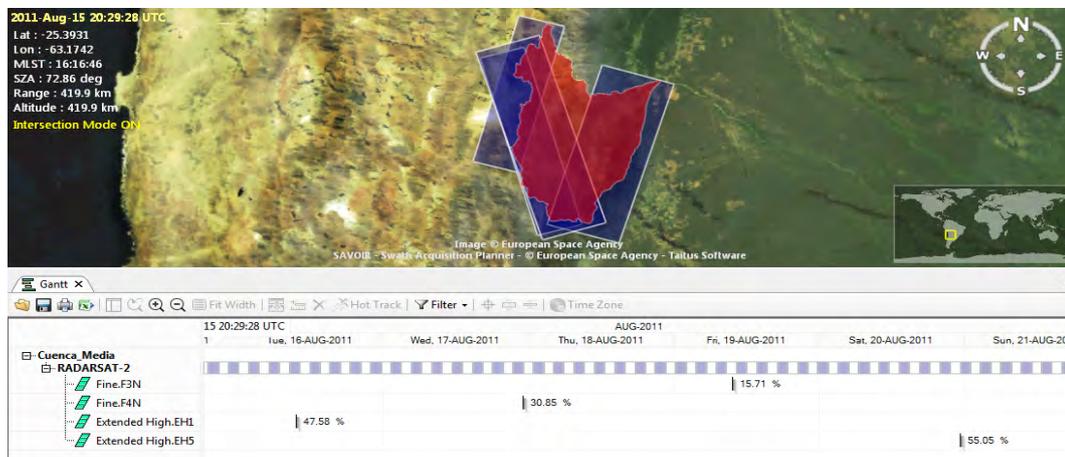


Figura 3.33: Imágenes seleccionadas por el planificador: Diagrama de Gantt y mapa

Para resolver estos casos donde el planificador no se comporta del modo más óptimo, nosotros proponemos aplicar una técnica comúnmente utilizada en el área de planificación, conocida como ampliación de dominio. Esta consiste en ampliar el espacio de estados donde el planificador realiza la búsqueda. Es decir, se trata de agregar al conjunto de potenciales adquisiciones algunas más, resultado de unificar las ya existentes.

Cabe destacar que la unión de adquisiciones se realiza considerando algunas leyes radiométricas, esto se debe a que un espacio monitoreado con radar responde de modo diverso según sus características, por ejemplo: textura y humedad (constante dieléctrica) y según las características del instrumento de medición, por ejemplo: modo de adquisición, ángulo de incidencia, polarización.

De este modo se establecen reglas sobre la unión de las adquisiciones, tales como “unir dos imágenes del mismo modo de adquisición y ángulo de incidencia” o “unir dos imágenes de igual modo de adquisición e igual polarización”. Las uniones además deben cumplir las restricciones temporales y deben ser realizadas siempre que las adquisiciones estén dentro de la misma pasada del satélite.

Para este escenario, por lo tanto se realizan dos uniones, sumando un total de 15 potenciales adquisiciones:

iMF4_Cuenca_Media_union - image

iMF22_Cuenca_Media_union - image

La primera imagen es resultado de la unión de las dos adquisiciones del modo MF4 del día 17/08, y la segunda imagen es resultado de unir las dos adquisiciones del modo MF22 del día 19/08. Para cada imagen resultante se definió:

Tiempo inicial: Mínimo de los tiempos de inicio de las adquisiciones base.

Tiempo final: Máximo de los tiempos finales de las adquisiciones base.

Porcentaje de área cubierta: Suma total de los porcentajes de área cubierta por las adquisiciones de base.

Porcentaje de adquisición utilizada: Promedio de los porcentajes de utilidad de las adquisiciones de base.

De este modo se define en el archivo `problem.pddl` las siguientes estructuras:

```
( = (area iMF4_Cuenca_Media_union) 41.42)
( = (timeStart iMF4_Cuenca_Media_union) 190226)
( = (timeEnd iMF4_Cuenca_Media_union) 190265)
( = (target_in_image iMF4_Cuenca_Media_union) 70.08)
(tupla iMF4_Cuenca_Media_union mMF4 MMulti_Look_Fine rCUENCA_MEDIA)
(at iMF4_Cuenca_Media_union d2011_7_17)

( = (area iMF22_Cuenca_Media_union) 20.03)
( = (timeStart iMF22_Cuenca_Media_union) 315012)
( = (timeEnd iMF22_Cuenca_Media_union) 315046)
( = (target_in_image iMF22_Cuenca_Media_union) 41.15)
(tupla iMF22_Cuenca_Media_union mMF22 MMulti_Look_Fine rCUENCA_MEDIA)
(at iMF22_Cuenca_Media_union d2011_7_19)
```

Una vez definidas estas “nuevas adquisiciones”, se ejecutó nuevamente el planificador y se obtuvo el resultado esperado. El planificador se seleccionó 4 adquisiciones (de las cuales dos son las adquisiciones unificadas), recorriendo 121 estados en 4.68 segundos.

Esta técnica nos permitió simular una realidad que es transparente para el planificador. Finalmente el siguiente código es un fragmento del plan obtenido, que corresponde a las imágenes proyectadas en el mapa de la figura 3.34.

```
0: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IEH5_CUENCA_MEDIA_1 MEH5 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_MEDIA D2011_7_20 ) [1]
1: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IEH1_CUENCA_MEDIA_0 MEH1 MEXTENDED_HIGH RCUENCA_MEDIA D2011_7_16 ) [1]
2: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IMF4_CUENCA_MEDIA_UNION MMF4 MMULTI_LOOK_FINE RCUENCA_MEDIA D2011_7_17 ) [1]
3: (TOMAR_PRIMERA_IMAGEN_DIA IMF22_CUENCA_MEDIA_UNION MMF22 MMULTI_LOOK_FINE RCUENCA_MEDIA D2011_7_19 ) [1]
4: (NO_TOMAR_IMAGEN_DIA_2 ...
```



Figura 3.34: Mapa con las adquisiciones seleccionadas por el planificador luego de la técnica de unificación

3.7. Resumen de resultados

En este capítulo se demostró el potencial de las técnicas de planificación frente a problemas propios de las misiones espaciales. Se recrearon distintas situaciones de prueba a través de las cuales se expuso la flexibilidad del lenguaje de planificación PDDL y la sensibilidad del planificador frente a la definición de distintas métricas.

Se demostró además la facilidad para incorporar nuevos sensores y satélites y para aplicar técnicas de soporte al planificador que ayuden a mejorar la búsqueda de soluciones óptimas, como la unificación de adquisiciones.

Las evaluaciones experimentales confirmaron que el tiempo de respuesta depende del número de estados que debe recorrer el planificador, el estado final al cual debe llegar y la métrica establecida. Por ejemplo, si el estado final requiere recorrer todas las posibilidades (es decir todas las imágenes debían ser controladas), entonces el tiempo de respuesta variaba de acuerdo al número inicial de potenciales adquisiciones. Esto se debe a que aumenta el grado de ramificación del árbol de búsqueda.

Por otro lado en el caso que teníamos el mismo número inicial de imágenes, con un estado final que limita el número de imágenes seleccionadas, el tiempo de respuesta fue inferior al caso en el cual el planificador tuvo que recorrer todas las posibilidades. Esto es porque el planificador sólo recorría los estados que lo conducían hacia la meta, es decir aquellos estados que aumentaban el contador de imágenes seleccionadas, reduciendo de este modo el número de posibilidades a la hora de evaluar un nodo en el árbol de búsqueda.

En el caso que se estableció una métrica que consideraba varios parámetros de evaluación (por ejemplo: área cubierta más prioridad del modo de adquisición), la función de evaluación se tornó más selectiva a la hora de elegir un nodo para continuar su búsqueda, lo cual redujo también el tiempo de respuesta. Esto se puede observar en la prueba realizada en la sección 3.6.2.

Si bien el algoritmo de búsqueda local **Enforced-hill-climbing** puede encontrar a menudo soluciones razonables en espacios de estados grandes con menor tiempo de respuesta (debido a que funciona con un sólo estado actual y se mueve sólo a sus vecinos reduciendo) se decidió operar con el algoritmo sistemático **Best-First**. Esto se debió principalmente a que el algoritmo **EHC** utiliza solamente la función heurística $f(n) = h(n)$ para evaluar los nodos, es decir sólo considera el costo del camino más barato desde un nodo n hasta el nodo objetivo,

pero ignora el costo para alcanzar el nodo n desde el estado inicial ($g(n)$). Por lo contrario el algoritmo **Best-First** evalúa cada nodo según el costo estimado de la solución, es decir combina $g(n)$ (el costo para alcanzar el nodo) y $h(n)$ (el costo de ir al nodo al objetivo). Esto es importante ya que la función $g(n)$ está definida por las métricas especificadas en cada problema de planificación. Por ejemplo para identificar en el árbol de búsqueda que un nodo es más “prometedor” que otros, tiene en cuenta el total de área cubierta o la prioridad de un modo de adquisición.

Por otro lado la búsqueda A^* (la forma más conocida de la búsqueda primero el mejor) es completa y óptima (siempre que $h(n)$ sea consistente). Esto significa que, si existe una solución, entonces A^* es capaz de encontrarla y además siempre encuentra la mejor (óptima) según su función de evaluación. Cabe aclarar que si bien Metric-FF usa el algoritmo WA^* , este está basado en los mismos principios que A^* , con la diferencia que se le añade un peso a cada una de las partes de la función de evaluación ($wg * g(n) + wh * h(n)$). Estos pesos pueden comprometer la calidad de la solución si se le da mayor valor a wh , priorizando alcanzar la meta en el menor costo según la heurística, sin embargo como en este trabajo se hizo mucho hincapié al hecho de seleccionar imágenes según los criterios de optimización, se definieron los valores $wg = wh = 1$.

Los planes obtenidos como respuestas en las evaluaciones, demostraron el buen funcionamiento de los criterios de optimización especificados a través de las funciones f_{ac} , f_s , f_{rm} y f_{ps} .

En conclusión este capítulo mostró que, a través de las diferentes técnicas de planificación, es factible desarrollar una herramienta operativa y robusta para abordar el problema de la planificación de imágenes satelitales.

Capítulo 4

Sistema integrado

Respondiendo al plan propuesto en la introducción del trabajo, este capítulo retoma la idea del objetivo general que consistía en el desarrollo de un prototipo de herramienta que permitiera la planificación de potenciales adquisiciones de imágenes satelitales vinculadas a un evento de emergencia.

Se expone un escenario de prueba y un bosquejo de la arquitectura del sistema general que integra los dos sistemas presentados en los dos capítulos anteriores.

4.1. Arquitectura

En esta sección se presenta una breve descripción de la arquitectura del sistema integrado. La imagen 4.1 muestra su esquema simplificado, donde las flechas interlineadas de color azul que conectan los módulos representan las interfases, las cajas azules representan los módulos o subsistemas del sistema general, las esferas corresponden a unidades propias de un subsistema, por unidades se entiende a uno o varios procesos encapsulados encargados de realizar una tarea en particular.

Las flechas negras expresan la interacción del sistema con el usuario, ya sea desde la obtención de datos hasta la visualización del resultado del proceso de planificación y por último las flechas amarillas indican la relación entre unidades de un mismo subsistema.

Se puede considerar que el sistema general está integrado por 5 módulos principales:

- Subsistema de ingestión de datos (SI): Este subsistema interactúa con el exterior, es el encargado de recibir los datos de entrada, procesarlos en caso de que sea necesario y almacenarlos. Se puede pensar que este subsistema está integrado por una o más unidades encargadas de la manipulación y transformación de datos, en el caso que sea necesario. De acuerdo a nuestro sistema, esta unidad está vinculada a los datos de entrada del modelo hidrológico, como por ejemplo, el proceso de digitalización del río a partir de un DEM.
- Subsistema de almacenamiento de datos (SA): Este sistema se comporta como un depósito de datos e interactúa con todos los subsistemas restantes. Se encarga del manejo de datos. La existencia de este

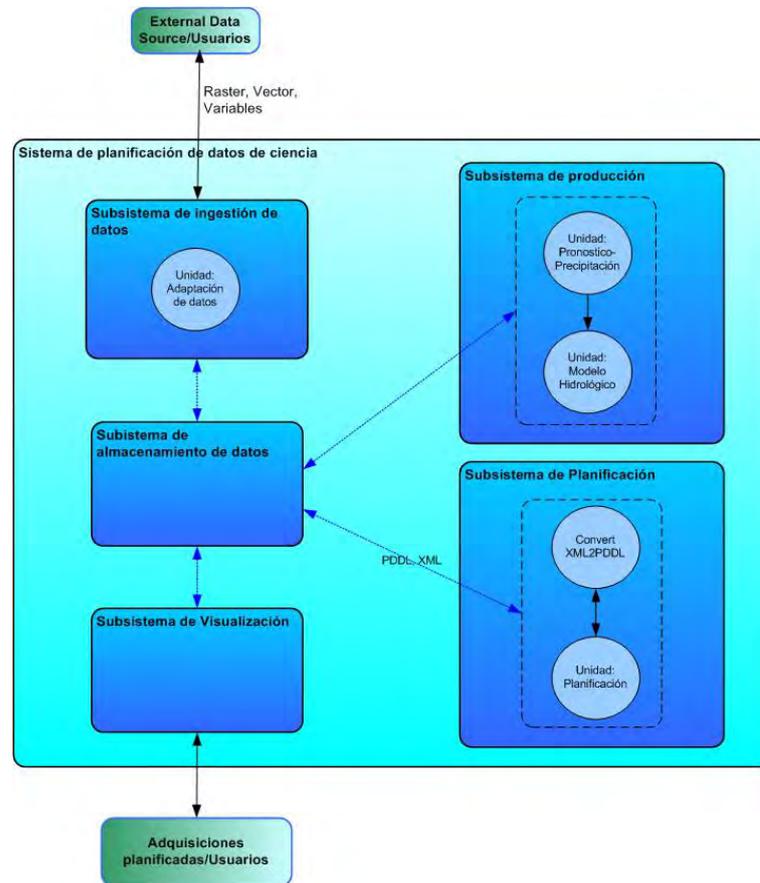


Figura 4.1: Esquema de la arquitectura del sistema integrado

subsistema permite modularidad, ya que los demás subsistemas no interactúan entre ellos sino que lo hacen a través de SA, de este modo las modificaciones realizadas en un módulo son transparentes para el resto.

- Subsistema de producción (SP) : Este subsistema está pensado para la implementación del modelo hidrológico desarrollado. Se pueden observar dos unidades principales, una encargada (en modificaciones futuras) de obtener un pronóstico de precipitaciones de modo automático (podría ser cada cierto tiempo) de algún depósito externo como un sitio web. La segunda unidad corresponde a la aplicación propiamente dicha del modelo, obteniendo los datos de entrada del subsistema SA y depositando luego su salida en el mismo.
- Subsistema de Planificación (SP1a): Este subsistema es el encargado de realizar la tarea de planificación de adquisiciones de imágenes satelitales y devolver un resultado. Para ello se consideran dos unidades generales, la primera vinculada a la conversión de datos de XML (formato de salida de los archivos de SaVoir) a PDDL (lenguaje utilizado para escribir dominio y problema de planificación). La segunda unidad refiere al planificador Metric-ff utilizado para la planificación de las adquisiciones. Este incluye los algoritmos de programación tales como *Best-First* y *Enforced-hill-climbing*

- Subsistema de Visualización (SVi): Actualmente este subsistema está representado por el software SaVoir, con el cual visualizamos las variables de entrada al planificador y las imágenes de salida seleccionadas.

4.2. Escenario integrado

Para integrar la implementación del modelo hidrológico aplicado a la cuenca del río Bermejo y el desarrollo de las técnicas de planificación presentadas en el capítulo 3, se presenta un escenario de prueba el cual permitirá hacer un análisis sobre el sistema total integrado.

El área de interés en este caso corresponde al área pronosticada por el modelo hidrológico en la sección 2.6.3. A partir de la imagen 2.44 se creó un vector el cual fue luego importado con el software SaVoir. La imagen 4.2 muestra el vector generado a partir de las zonas de desborde pronosticadas por el modelo hidrológico.

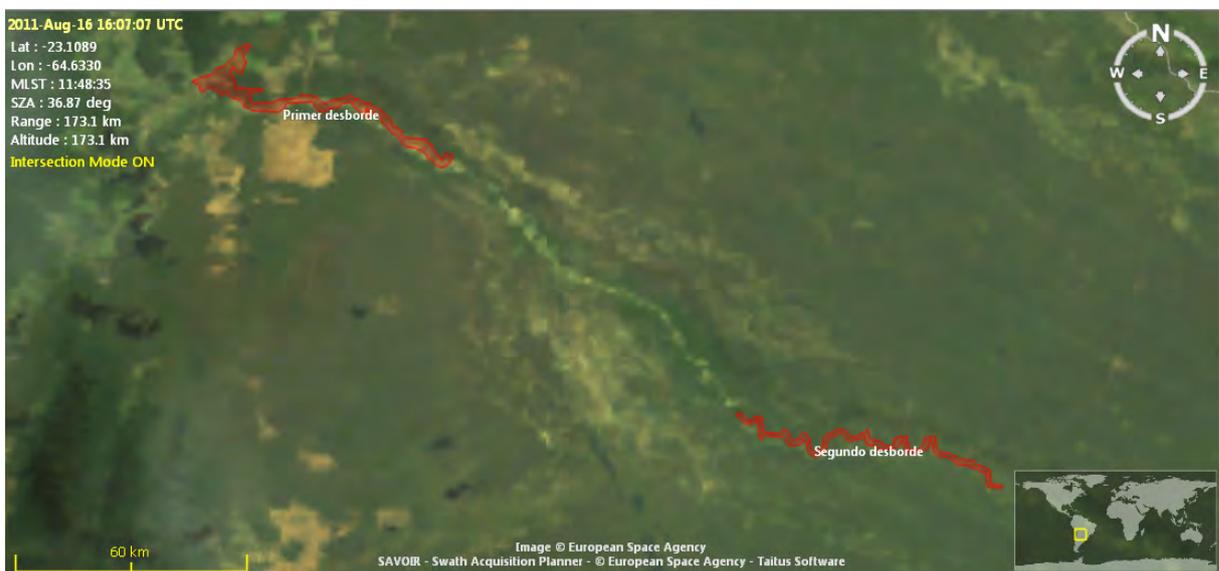


Figura 4.2: Vector generado a partir de las zonas pronosticadas por el modelo hidrológico.

Como las zonas de desborde son regiones angostas, se decidió trabajar con los modos *Ultrafine* y *Fine* del sensor SAR del satélite Radarsat, cuyas resoluciones espaciales son las más alta que ofrece el instrumento, 3m y 8m respectivamente. A continuación se presentan algunas características de los modos utilizados en este escenario de prueba:

- F1 - Fine: Ángulo de incidencia = (36.9°, 39.9°). Ancho de Swath = 55 km
- F21N - Fine: Ángulo de incidencia = (33.9°, 37.1°). Ancho de Swath = 55.3 km
- F5 - Fine: Ángulo de incidencia = (45°1, 47.7°). Ancho de Swath = 57.6 km
- F23F - Fine: Ángulo de incidencia = (30.8°, 34.2°). Ancho de Swath = 55.6 km
- U6 - Ultrafine: Ángulo de incidencia = (34°, 35.3°). Ancho de Swath = 22.1 km
- U12 - Ultrafine: Ángulo de incidencia = (38.7°, 39.9°). Ancho de Swath = 22.4 km

- U26 - Ultrafine: Ángulo de incidencia = (47.9°, 48.9°). Ancho de Swath = 23.4 km

Se planificaron imágenes (con el software SaVoir) durante un intervalo de 7 días (16/08/2011 al 22/08/2011), cubriendo el tiempo de ejecución del modelo hidrológico. De este modo se simula el seguimiento remoto del evento de inundación a partir de las imágenes satelitales, es decir se podrían obtener imágenes sobre una zona de desborde antes, durante y después de ocurrido el evento.

La zona indicada con la etiqueta “Primer desborde” ocurre entre el primer y segundo día de simulación y la zona etiquetada como “Segundo desborde” ocurre durante el quinto y sexto día de simulación. Por lo tanto, las imágenes seleccionadas los primeros días de simulación sobre la primera región, nos brindarán información durante el inicio del evento de inundación. Por otro lado las adquisiciones del mismo día de planificación ubicadas sobre la segunda región de interés, serán pre-evento, las cuales son útiles para realizar posteriores estudios.

Algo similar ocurre con las imágenes seleccionadas los últimos días de planificación, las cuales nos brindarán información durante la ocurrencia del evento sobre la segunda región, e información post-evento (por ejemplo: ver zonas anegadas) sobre la primera región de desborde.

En caso de que las regiones compitan por las adquisiciones, es factible modificar el predicado (`priority_region ?r - region`) definido en el dominio PDDL, el cual establece la prioridad de las regiones. Se puede modificar de modo tal que además de considerar la región de interés, considere el día de planificación; es decir re-definir el predicado como: (`priority_region ?r - region ?d - dia`).

De este modo, por ejemplo si se quisiera priorizar la toma de imágenes satelitales durante la ocurrencia del evento, nosotros podríamos establecer una mayor prioridad para la región 1 (primer desborde) los primeros días de planificación y una prioridad baja para la región 2 en ese mismo tiempo y de modo inverso para los últimos días de planificación.

La figura 4.3 refleja a través del gráfico de curvas lo explicado anteriormente, donde se puede observar la variación de los valores de prioridad dependiendo de la región de interés y del tiempo (día de planificación). Las líneas punteadas de rojo limitan un intervalo de tiempo vinculado al período de desborde-inundación considerado más crítico sobre ambas regiones de interés. Cabe destacar que estos gráficos pueden ser distintos de acuerdo a interés específicos y/o criterios de evaluación de especialistas en hidrología.

Lo importante es que independientemente de como sea establecida la curva de prioridad, su comportamiento puede ser reflejado con el predicado (`priority_region ?r - region ?d - dia`) en el dominio y en el problema de planificación.

En total se planificaron 13 potenciales adquisiciones, donde se estableció la misma prioridad para las dos áreas de interés, pero se definió una mayor prioridad para el modo *Ultrafine* que para *Fine*, debido a que las regiones de desborde son pequeñas y las imágenes con mayor resolución espacial brindan información más detallada. Del mismo modo que se modificaría el predicado que establece las prioridades de las regiones, se podría modificar el predicado que determina las prioridades de los modos de adquisición, de modo tal que considere por ejemplo las regiones de interés y/o el día de planificación. El predicado se re-definiría como (`priority_mode ?m - modo ?r - region ?d - dia`), el cual nos permitiría reflejar curvas de prioridad de los modos de adquisición vinculadas a las regiones y los días de planificación.

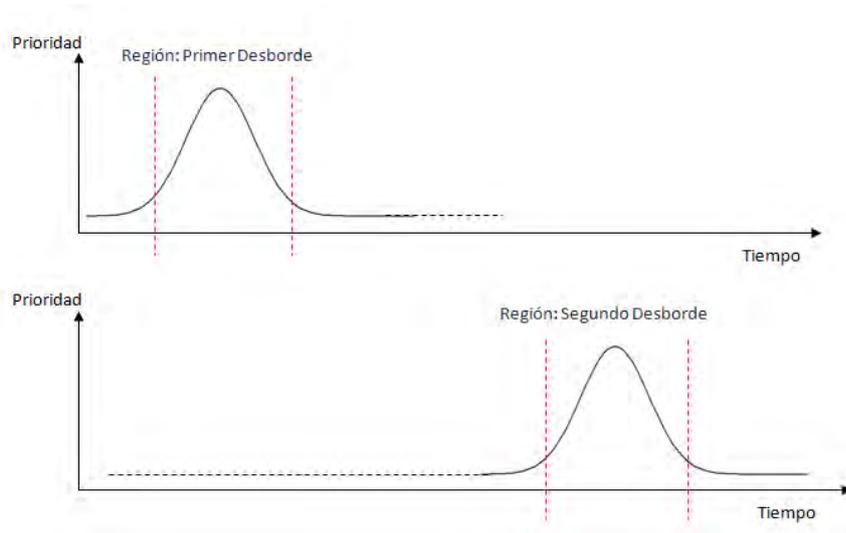


Figura 4.3: Curvas de prioridad sobre las regiones de interés dependiente del tiempo

Un ejemplo de esto puede ser que durante los primeros días de planificación, sobre la segunda región de desborde se priorice un modo de baja resolución (píxel grande) que cubra el mayor porcentaje de área, justificando que no es necesaria una imagen más detallada de la zona en una situación pre-evento. Por lo contrario durante los últimos días de planificación, se priorizarían los modos de adquisición de alta resolución sobre dicha región para obtener mayor detalle de la zona durante la ocurrencia del evento.

El plan resultante fue evaluado según el área total cubierta por cada imagen y el modo de adquisición de las mismas. Es decir se trabajó con la siguiente métrica:

`(:metric minimize (+ (* 1 (total_area)) (* 1 (total_priority_modes))))`

La imagen 4.4 muestra el diagrama de Gantt de las potenciales adquisiciones sobre las regiones de desborde para los 7 días de planificación.

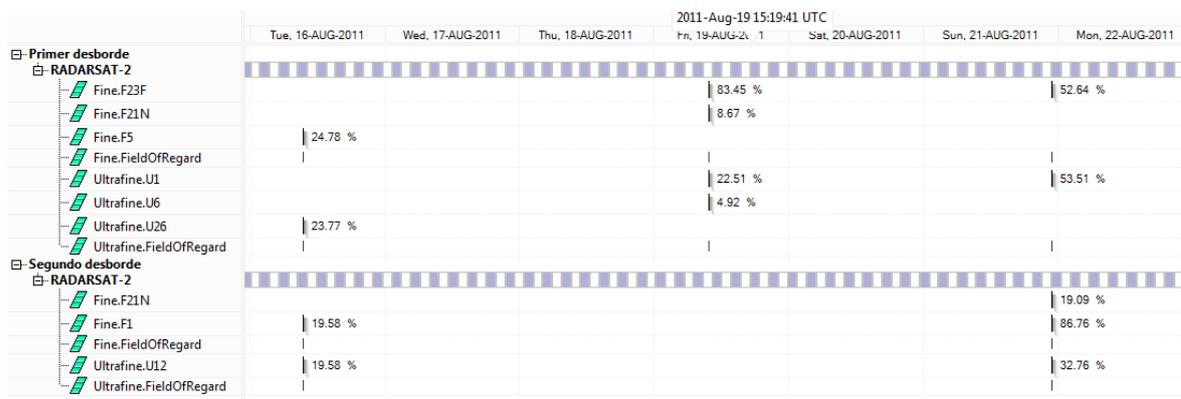


Figura 4.4: Diagrama de Gantt: potenciales adquisiciones sobre las regiones de desbordamiento

El planificador encontró una solución en 40 segundos y recorrió un total de 30782 estados. La imagen 4.5 muestra el resultado obtenido, donde se seleccionaron 5 imágenes de las 13 totales evaluadas según la métrica

establecida.

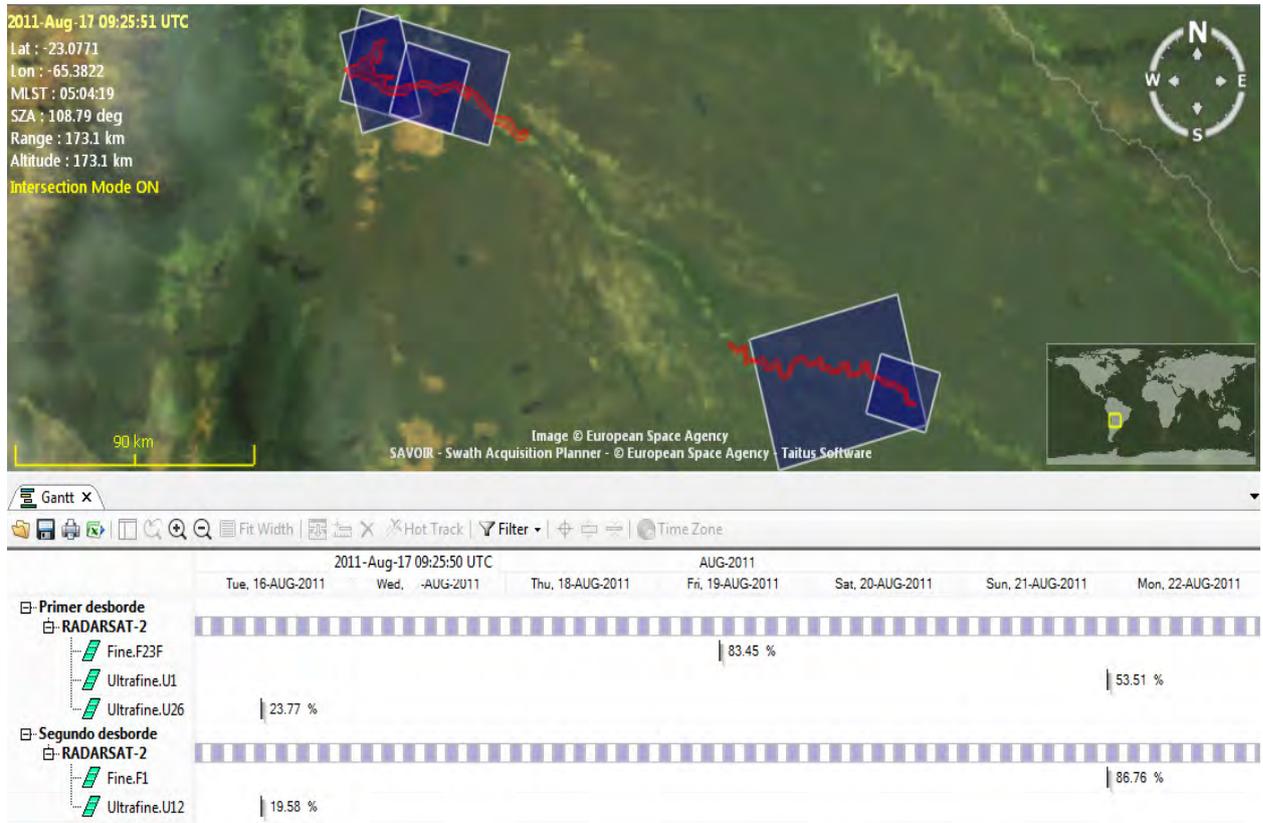


Figura 4.5: Mapa y diagrama de Gantt de las imágenes seleccionadas sobre las regiones de desborde

Como se puede notar en el diagrama de Gantt de salida, la selección entre modos fue variada, en algunos casos se priorizó el total de área cubierta y en otros el modo de adquisición. Por ejemplo: de las dos potenciales adquisiciones con el mismo porcentaje de cobertura disponibles durante el primer día de planificación, sobre la segunda región de interés, se seleccionó la imagen con mayor resolución espacial *Ultrafine.U12* (ver figura 4.4). Sin embargo en el cuarto y sexto día de planificación, donde por conflictos temporales, sólo se podía seleccionar una imagen diaria por región, ocurrió lo contrario. Si bien el modo *Ultrafine* tiene mayor prioridad se seleccionaron adquisiciones de modo *Fine*, esto se debe a que el porcentaje de área cubierta era elevado y tuvo mayor peso en la función de evaluación que le determina al planificador que estado elegir.

4.3. Resumen

En este capítulo se presentó la arquitectura del sistema integrado, se explicaron las tareas realizadas y las responsabilidades de cada uno de los módulos y unidades principales del sistema.

Con el fin de mostrar el funcionamiento del sistema completo, se expuso un escenario de prueba. Este escenario utiliza los resultados del modelo hidrológico como disparador de la planificación de imágenes satelitales realizadas por el planificador Metric-ff y visualizadas posteriormente con el software SaVoir. Es importante

destacar que el modelo hidrológico no sólo brinda información sobre la distribución geográfica de las áreas afectadas, sino que también determina la variable tiempo.

En este capítulo se mostró nuevamente la flexibilidad que brinda el lenguaje PDDL, la factibilidad de modificar los predicados especificados en el dominio de planificación, de modo tal que considere prioridades variables dependiendo de criterios de evaluación establecidos por expertos en la materia (por ejemplo: hidrólogos). Se demostró, además, la variación sobre la elección de los modos de adquisición dependiendo de la métrica, es decir considerando región de interés y tiempo.

Algunas consideraciones a tener en cuenta son:

- Los datos que alimentan al modelo hidrológico desarrollado en este trabajo son difíciles de automatizar completamente ya que deben ser sometidos a una serie de procesos previos. Sin embargo algunos de estos procesos fueron implementados en IDL para realizar las tareas de modo automático.
- En este caso se creó el vector utilizado en el software SaVoir con ArcGis, esto no se podría realizar de modo automático, pero si se podrían utilizar otras librerías de GIS Open Source para realizar la misma tarea como Quantum GIS.
- Si bien el software SaVoir nos brinda información importante para realizar la planificación de acuerdo a criterios de optimización, no es un software libre y por lo tanto no permite modificaciones. Si se desea hacer un herramienta automática, será necesario obtener los datos de entrada desde otro lado.

Capítulo 5

Conclusiones

¿Dónde? y ¿Cuándo? son las dos incógnitas principales en las cuales se basa el planificador para seleccionar, de todo el conjunto disponible, algunas adquisiciones de imágenes satelitales. El modelo hidrológico implementado responde a estas incógnitas, ya que no sólo nos permite pronosticar áreas afectadas, sino que también brinda información vinculada al tiempo, es decir desde que se inicia la inundación y a medida que el frente de onda avanza aguas abajo.

La elección de implementar un modelo de onda cinemática de complejidad reducida (es decir utilizando una ecuación simplificada de Saint-Venant) provocó una disminución del tiempo de ejecución permitiendo optimizar el tiempo de respuesta sobre el pronóstico de posibles eventos de inundación. Por otro lado la reducción del número de cálculos hidrodinámicos en la implementación del modelo (como por ejemplo, no calcular las matrices de caudal para zonas en las cuales no había presencia de agua) permitió aumentar la eficiencia computacional reduciendo también de este modo los tiempos de ejecución, lo cual implica una ganancia valiosa para configurar las futuras adquisiciones de los satélites con anticipación, brindándonos la posibilidad de obtener imágenes satelitales inclusive antes de que la inundación ocurra.

La elección de aplicar el modelo sobre la zona del río Bermejo (río de llanura) ubicado al norte de nuestro país, nos permitió disponer de los datos hidrológicos relevantes utilizados como entradas al modelo. Esto no es un dato menor ya que como se mencionó en la introducción las investigaciones en el área de hidrología están fuertemente limitadas por este motivo. Si bien el modelo fue aplicado a esta zona que presenta características particulares, cabe destacar que la metodología general desarrollada permite que el modelo sea aplicado sobre otra áreas.

Los resultados demostraron la capacidad del modelo para replicar el comportamiento del proceso de escurrimiento sobre zonas con poca pendiente. A su vez, el modelo sometido a grandes perturbaciones, demostró estabilidad numérica y un adecuado proceder respecto a los principios hidrológicos tales como la conservación de masa y conectividad de flujo.

Como se mencionó en varias oportunidades a lo largo de este trabajo, el tiempo es una variable decisiva frente a situaciones de emergencias y fue fuertemente considerada al momento de implementar el modelo hidrológico. La suma del modelo hidrológico implementado más la herramienta de planificación permiten reducir el tiempo

durante las etapas de “activación y adquisición”. Es decir las dos herramientas sumadas son de gran soporte para programar los pedidos de adquisiciones dentro de la ventana de configuración de tiempo mínima de cada satélite, evitando perder pasadas relevantes del mismo.

Si bien el algoritmo **Best-First** de planificación utilizado en las evaluaciones experimentales no es el más veloz (en comparación con otros algoritmos), se considera que resolvió los problemas de planificación más rápido de lo que lo haría un operador humano, sin mencionar que el planificador lo hace de manera automática y evalúa diversos criterios de optimización.

Esto es un resultado importante cuando se está frente a situaciones de emergencias y nos pone en ventaja frente a las técnicas tradicionales (usadas en la mayoría de las misiones espaciales que no tienen un sistema que pueda automatizar esta selección de productos) donde se debe esperar la activación de pedidos individuales que le determinan al operador cuales zonas monitorear.

Por otro lado la selección de adquisiciones de imágenes realizada a través de las técnicas de planificación con métricas, no sólo nos aporta ventajas en la reducción del tiempo, sino que permite optimizar el uso del satélite y los recursos terrenos involucrados en la generación de productos de valor agregado, ya que podemos especificar cuales productos son relevantes para un evento en particular.

Inclinarnos a utilizar técnicas de planificación clásica para abordar el problema de planificación de imágenes satelitales nos permitió realizar una investigación sobre la disponibilidad de diversos algoritmos de búsqueda y planificadores, ya que existe mucha documentación al respecto debido a que es el tipo de planificación comúnmente más usada. Por este motivo existe una tendencia en la actualidad a continuar desarrollando planificadores cada vez más eficientes (dentro de la planificación clásica) brindándonos una línea de continuidad.

El lenguaje PDDL con el cual se especificaron los dominios y problemas hace posible que los algoritmos de planificación se aprovechen de la estructura lógica del problema. Debido a que es el lenguaje más utilizado, nos brinda un estándar para la presentación e intercambio de modelos de dominio de planificación, con el objetivo de comparar a futuro la performance de diversos algoritmos para decidir cual es el “mejor”.

El planificador Metric-ff es uno de estos tipos de planificadores y ha demostrado un buen rendimiento en las pruebas realizadas en las secciones precedentes, soportando correctamente el concepto de métricas lo cual era relevante en este trabajo.

La finalidad de las ideas presentadas como conclusiones es destacar que las técnicas seleccionadas para abordar el problema de planificación e implementación del modelo hidrológico tienen su fundamento teórico y han demostrado ser acertadas para cumplir con los objetivos planteados inicialmente.

Estos resultados motiva a la utilización de herramientas de planificación como soporte en la adquisiciones de imágenes. Haciendo un análisis del trabajo desarrollado, se concluye que es factible desarrollar dicha herramienta operativa que permita planificar imágenes satelitales vinculadas en el caso de emergencias a algún evento en particular, que actúe como disparador. Los desarrollos presentados, conforman una base sólida sobre la cual se podría implementar esta herramienta, que sirva de soporte tanto a usuarios como a desarrolladores en la tarea de planificación, considerando diversos criterios de optimización.

Por último cabe mencionar que este trabajo no sólo aporta los módulos implementados para su posterior

utilización y mejora, sino que también deja a disposición los resultados teóricos obtenidos a partir de la tarea de investigación llevada a cabo.

5.1. Líneas futuras

Respecto al modelo hidrológico

Si bien este modelo no fue validado con datos reales, creemos que la capacidad de combinar estas descripciones simplificadas de flujo superficial con descripciones detalladas de la topografía permitirán que las salidas producidas por el modelo puedan ser fácilmente calibradas/validadas usando datos de sensado remoto. Esta tarea pendiente puede ser considerada dentro de las propuestas futuras de trabajo, además de :

- Incorporar al modelo otros procesos influyentes en el ciclo hidrológico tales como la evapotranspiración, flujo subterráneo e infiltración.
- Variar el coeficiente de Manning en el espacio, es decir el coeficiente de Manning podría ser ingresado como una capa de información externa con un valor para cada píxel en lugar de ser una constante.
- Considerar el aporte de otros canales y afluentes principales.
- Agregar como dato de entrada el ancho real del río.
- Variar altura caudal y altura hidrométrica a lo largo del recorrido del río en el estado de equilibrio inicial.
- Establecer un paso de tiempo adaptativo para la planicie.
- Aplicar el modelo a resoluciones espaciales más grandes.
- Incorporar un pronóstico real de precipitaciones.

Respecto a las técnicas de planificación

Los distintos análisis realizados en la sección 3.6 revelaron que el planteamiento actual de la técnica permite puntos de refinamiento y dejan el campo abierto a futuras líneas de investigación. Algunas propuestas para trabajos futuros son:

- Cada planificador utiliza algoritmos de búsqueda ampliamente estudiados, documentados y puestos a prueba, por lo tanto se podrían implementar estos algoritmos con modificaciones basadas en el conocimiento del dominio (en lugar de usar planificadores independientes de dominio) y definir heurísticas específicas transmitiendo el conocimiento adicional del problema a los algoritmos de búsqueda.
- Debido a que el tiempo empleado por las evaluaciones sigue siendo un problema abierto en las técnicas de planificación, se propone incursionar en otros enfoques de planificación, como la planificación basada en líneas de tiempo. Este enfoque tiene una conexión estricta con técnicas para “problemas de satisfacción de restricciones” (PSR o CSP por sus siglas en inglés). En la mayoría de las aplicaciones prácticas, los

algoritmos para PSR de uso general pueden resolver problemas de órdenes de magnitud más grande que los resolubles con los algoritmos de búsqueda de uso general.

- Sumar al problema de planificación, la transmisión de imágenes dependiendo de las estaciones terrenas disponibles. Este agregado está asociado a técnicas de programación (*scheduling*) más que a la planificación ya que las estaciones terrenas serían los recursos que nos determinan el “cuando actuar”.

Bibliografía

- Ambros-Ingerson, J. & Steel, S. (1988). Integrating planning, execution and monitoring. *Proceedings of AAAI-88*, pages 83–88.
- Aronica, G., Bates, P., & Horritt, M. (2002). Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within glue. *Hydrological Processes* 16, 10:2001–2016.
- Aronica, G., Hankin, B., & Beven, K. (1998). Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources* 22, 4:349–365.
- Ashley, R., Balmforth, D., Saul, A., & Blanskby, J. (2005). Flooding in the future - predicting climate change, risks and responses in urban areas. *Water Science and Technology* 52, 5:265–273.
- Atlas, T. d. l. R. A. (1982). Atlas total de la república argentina. vol. 1 y 2. Technical report, Centro Editor de América Latina, Buenos Aires.
- Barrett, A., Christianson, D., Friedman, M., Golden, K., Kwok, C., Penberthy, J., Sun, Y., & Weld, D. (1995). Ucpop user's manual. *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems*, pages 142–149.
- Bates, P. & De Roo, A. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236, 236:54–77.
- Bates, P., Stewart, M., Siggers, G., Smith, C., Hervouet, J., & Sellin, R. (1998). Internal and external validation of a two dimensional finite element model for river flood simulation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering* 130, 3:127–141.
- Bates, P. D., Dawson, R. J., Hall, J. W., Horritt, M. S., Nicholls, R. J., Wicks, J., & Mohamed, A. A. M. H. (2005). Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. *Coastal Engineering*, 52:793–810.
- Bechteler, W. & Hartmaan, S. and Otto, A. (1994). In: White, w.r., watts, j. (eds.) proceedings of the 2nd international conference on river flood hydraulics. *John Wiley and Sons, Chichester*, pages 155–165.
- Bellman, R. (1978). An introduction to artificial intelligence: Can computers think? *Boyd & Fraser Publishing Company*.

- Bensana, E., Lemaitre, M., & G., V. (1999). Earth observation satellite management. *Constraints*, 4:293–299.
- Bentley, P. J., Doheon, L., & Sungwon, J. (2008). Artificial immune systems. *Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany*, 978-3-540-85071-7.
- Beven, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1):1–12.
- Bianchesi, N. & Righini, G. (2008). Planning and scheduling algoritmos for the cosmo-skymed constellation. *Aerospace Science and Technology*, 12:535–544.
- Blum, A. & Furst, M. (1995). Fast planning through planning graph analysis. In *Mellish, C. S., editor, Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-95*, 2:1636–1642.
- Blum, A. & Furst, M. (1997). Fast planning through planning graph analysis. *Artificial Intelligence*, 90:281–300.
- Blythe, J., Etzioni, O., Gil, Y., Joseph, R., Kahn, D., Knoblock, C., Minton, S., Pérez, A., Reilly, S., Veloso, M., & Wang, X. (1991). Prodigy 4.0: The manual and tutorial. *Carnegie Mellon University*. Technical report CMU-CS-92-150.
- Boussinesq, J. (1877). Essai sur lathéorie des eaux courantes. *Mem Acad Sci Inst Fra*, 23(1):252–260.
- Boussinesq, J. (1897). Théorie de l’écoulement tourbillonnant et tumultueux des liquides dans les lits rectilignes à grandes sections.paris: Gauthier-villars.
- CADAM (2000). Cadam-concerted action on dambreak modelling. report sr 571. Technical report, EC Environment and Climate Programme.
- Cesta, A., Cortellessa, G., Oddi, A., & Policella, N. (2003). A csp-based interactive decision aid for space mission planning. In *A. Cappelli y F. Turini (Eds): AI*IA-03, Lecture Notes on Artificial Intelligence (LNAI) N. 2829*, pages 511–522.
- Cesta, A. & Milani, A. (2006). Planning and scheduling. *Journal on Artificial Intelligence. Special Issue for the 50th AI Anniversary*, 3(1-2):35–41.
- Chen, Y., Hsu, C., & Wah, B. (2004). Sgplan: Subgoal partitioning and resolution in planning. *IPC-4 Booklet (ICAPS)*.
- Chow, V. T. & Ben-Zvi, A. (1973). Hydrodynamic modeling of twodimensional water flow overbank flow in the floodplain. *Journal of the Hydraulics Division ASCE 99*, 11:2023–2040.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Libro: Hidrología aplicada. *Cap. 1*.
- Chuvieco, E. (2006). Teledetección ambiental - la observación de la tierra desde el espacio, 2da edición. *Cap. 1*.
- Cunge, J., Holly, F., & Verwey, A. (1980). Practical aspects of computational river hydraulics. *Journal of Hydrology*, page 420.

- Currie, K. & Tate, A. (1991). O-plan: the open planning architecture. *Artificial Intelligence*, 52:49–86.
- Daluz Vieira, J. (1983). Conditions governing the use of approximations for the saint-venant equations for shallow water flow. *Journal of Hydrology*, 60:43–58.
- Daniele, C. & Natenzon, C. (1988). Las regiones naturales de la argentina: caracterización y diagnóstico. *Apunte de la cátedra de Ecología y Biogeografía de la Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Buenos Aires*.
- Dawson, R., Hall, J., Bates, P., & Nichols, R. (2005). Quantified analysis of the probability of flooding in the thames estuary under imaginable worst-case sea level rise scenarios. *International Journal of Water Resources Development* 21, 4:577–591.
- Dhondia, J. & Stelling, G. (2002). Stelling, g.s., 2002. application of one-dimensional-al-two-dimensional integrated hydraulic model for flood simulation and damage assessment. *Hydroinformatics 2002: Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, 1:265–276.
- Downer, C. & Ogden, F. (2006). Gridded surface subsurface hydrologic analysis (gssha). *User's Manual: Version 1.43 for Watershed Modeling System 6.1*, page 207.
- Downer, C., Ogden, F., Martin, W., & Harmon, R. (2002). Theory, development, and applicability of the surface water hydrologic model casc2d. *Hydrological Processes*, 16:255–275.
- Erol, K. & Hendler, J. D. N. (1994). Ucmp: A sound and complete procedure for hierarchical task-network planning. *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems*, pages 249–254.
- ESRI (Copyright ©1999-2008). *Manual de ayuda de la herramienta ArcGis*. Sección: Deriving runoff characteristics.
- Estrela, T., Q. L. (1997). Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling. *Hydrological Processes*, 11:1777–1795.
- Estrela, T. & Quintas, L. (1994). Use of gis in the modelling of flows on floodplains. *John Wiley and Sons, Chichester*, pages 177–189.
- Feldhaus, R., Höttges, J., Brockhaus, T., & Rouvé, G. (1992). Finite element simulation of flow and pollution transport applied to a part of the river rhine. *Hydraulic and Environmental Modelling: Estuarine and River Waters*, Ashgate publishing, Aldershot, pages 323–334.
- Ferrick, M. (1985). Analysis of river wave types. *Water Resources Research*, 21:209–212.
- Fikes, R. & Nilsson, N. (1971). Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*, 2(3-4):189–208.
- Fox, M. & Long, D. (2003). Pddl2.1: An extension to pddl for expressing temporal planning domains. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 20:61–124.

- Frank, J., Jonsson, A., Morris, R., & Smith, D. (2001). Planning and scheduling for fleets of earth observing satellites. *6th International Symposium on A.I., Robotics and Automation for Space*.
- Fratini, S., Pecora, F., & Cesta, A. (2008). Unifying planning and scheduling as timelines in a component-based perspective. *In Archives of Control Sciences*, 18(2):231–271.
- Geffner, H. (2000). Functional strips: a more flexible language for planning and problem solving. *Logic-Based Artificial Intelligence*.
- Gerevine, A. & Derek, L. (2005). Bnf description. *PDDL3.0*.
- Gerevini, A. & Serina, I. (2000). Local and systematic search techniques. *Proceedings of the Conference on AI Planning Systems (AIPS)*, pages 112–121.
- Ghallab, M., Howe, A., Knoblock, C., McDermott, D., Ram, A., Veloso, M., Weld, D., & Wilkins, D. (1998). Pddl - the planning domain definition language version 1.2. *This manual was produced by the AIPS-98 Planning Competition Committee*.
- Globus, A., Crawford, J., Lohn, J., & Pryor, A. (2003). Scheduling earth observing satellites with evolutionary algorithms. *International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT)*.
- Goldman, R. & Boddy, M. (1994). Epsilon-safe planning. *Proceedings of the 10th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, pages 253–261.
- Green, C. (1969). Applications of theorem proving to problem solving. *Proceedings of the First International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-69)*, 226:741–747.
- Halcrow Group Ltd, H. W. (2004). Thames embayments inundation modelling. stage 2a: Model testing. Technical report, EC Environment and Climate Programme: Discussion Paper for the Environment Agency Halcrow Group Ltd, Swindon.
- Hall, J., Sayers, P., & Dawson, R. (2005). National-scale assessment of current and future flood risk in england and wales. *Natural Hazards* 36, 1-2:147–164.
- Harrison, S., Price, M., & Philpott, M. (1999). Task scheduling for satellite based imagery. *PLANSIG99, 18th Workshop of the U.K. Planning and Scheduling Special Interest Group*.
- HEC-RAS (2002). Hec-ras, river analysis system, user’manual. *US Army Corps of Engineers, Hydrological Engineering Center, Davis, CA*, Report No. CPD-68.
- Hoffman, J. (2001). Ff: The fast-forward planning system. *AI Magazine*, 3(22).
- Hoffman, J. (2003). The metric-ff planning system: Translating “ignoring delete lists” to numeric state variables. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 20.
- Hoffmann, J. & Nebel, B. (2001). The ff planning system: Fast plan generation through heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 14:253-302.

- Horritt, M. (2000). Calibration and validation of a 2-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resources Research* 36, 11:3279–3291.
- Horritt, M. & Bates, P. (2001a). Effects of spatial resolution on a raster-based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, 253:239–249.
- Horritt, M. & Bates, P. (2001b). Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite element approach. *Hydrological Processes*, 15:825–842.
- Horritt, M., Mason, D., & Luckman, A. (2001). Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model. *International Journal of Remote Sensing* 22, 13:2489–2507.
- Hromadka, T. & Yen, C. (1986). A diffusion hydrodynamic model(dhm). *Resources* 9, 3:118–170.
- http://en.wikipedia.org/wiki/Bermejo_River (Consultada en mayo de 2011). Río bermejo.
- http://es.wikipedia.org/wiki/Formula_de_Manning (Consultada en mayo de 2011). Formula de manning.
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Hidrologia> (Consultada en junio de 2011). Hidrología.
- http://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_inteligencia_artificial (Consultada en junio de 2011). Historia de la inteligencia artificial.
- <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/> (Consultada en abril de 2011). Hydrological data and maps based on shuttle elevation derivatives at multiple scales.
- <http://www.corebe.org.ar/index.php> (Consultada en mayo de 2011). Comisión regional del río bermejo.
- <http://www.disasterscharter.org/web/charter/home> (2011). Carta internacional sobre el espacio y grandes catástrofes.
- http://www.esri.chile.com/biblioteca/RADARSAT_2.pdf (Consultada en junio de 2011). Radarsat-2.
- <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea22s/begin.htm> (1973-1977). Cuenca del plata - estudio para su planificación y desarrollo - república argentina. *Estudio llevado a cabo por la Unidad Técnica durante el periodo 1973-1976. Gobierno de Argentina. Programa de Desarrollo Regional.*
- <http://www.preventionweb.net/english/countries/statistics/?cid=7> (2011). International strategy for disaster reduction.
- Hunter, N., Bates, P., Horritt, M., De Roo, A., & Werner, M. (2005). Utility of different data types for calibrating flood inundation models within a glue framework. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 4:412–430.
- Hunter, N., Bates, P., Horritt, M., & Wilson, M. (2007). Simple spatially distributed models for predicting flood inundation: a review. *Geomorphology* 90, pages 208–225.
- Iwasa, Y. & Inoue, K. (1982). Mathematical simulations of channel and overland flood flows in view of flood disaster engineering. *Journal of Natural Disaster Science* 4, 1:1–30.

- Jaber, F. & Mohtar, R. (2002). Dynamic time step for one-dimensional overland flow kinematic wave solution. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers* 7, 1:3–11.
- Jaber, F. & Mohtar, R. (2003). Stability and accuracy of two-dimensional kinematic wave overland flow modeling. *Advances in Water Resources* 26, pages 1189–1198.
- Jenson, S. K. & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54, 11:1593–1600.
- J.F., C. & G., L. (2005). Maximizing the value of an earth observation satellite orbit. *Journal of the Operational Research Society*, 56:962–968.
- Julien, P., Saghafian, B., & Ogden, F. (1995). Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff. *Water Resources Bulletin* 31, 3:523–536.
- Katapodes, N. & Strelkoff, T. (1979). Two-dimensional shallow waterwave model. *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE* 105 (EM2), pages 317–334.
- Katopodes, N. (1982). On zero-inertia and kinematic waves. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers* 108 (HY11), 2:1380–1385.
- Kawahara, M. & Yokoyama, T. (1980). Finite element method for direct runoff flow. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 106 (HY4), pages 519–534.
- Knight, D. & Shiono, K. (1996). River channel and floodplain hydraulics. In: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.), *Floodplain Processes*. Wiley, Chichester, pages 139–182.
- Lemaitre, M., Verfaillie, G., Jouhaud, F., Lachiver, J., & Bataille, N. (2002). Selecting and scheduling observations of agile satellites. *Aerospace Science and Technology*, 6:367–381.
- Long, D. & Fox, M. (2002). Progress in ai planning research and applications. *UPGRADE. The European Online Magazine for the IT Professional*, 3(5):10–24.
- Malik, G., Nau, D., & Paolo, T. (2004). Automated planning: Theory and practice. *Morgan Kaufmann*, 978-1-55860-856-6.
- Marcano, J. E. (Consultada en junio de 2011). Ciencias de la tierra: La hidrología. <http://jmarcano.topcities.com/ciencias/hidrologia.html>.
- Marks, K. & Bates, P. (2000). Integration of high resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes*, 14:2109–2122.
- McAllester, D. & Rosenblitt, D. (1991). Proceedings of the ninth national conference on artificial intelligence. *Systematic nonlinear planning*, pages 634–639.

- McCarthy, J. & Hayes, P. (1969). Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. *Machine Intelligence*, 4:463–502.
- McDermott, D. (1996). A heuristic estimator for means-ends analysis in planning. *In Proceedings of the Third International Conference on AI Planning Systems*.
- McDermott, D. (2000). The 1998 ai planning systems competition. *AI Magazine*, 21(2):35–55.
- Middelkoop, H., Van Asselt, M., Van't Klooster, S., Van Deursen, W., Kwadijk, J., & Buiteveld, H. (2004). Perspectives on flood management in the rhine and meuse rivers. *River Research and Applications* 20, 3:327–342.
- MIKE11 (2003). A modelling system for river and channels. *Short Introduction Tutorial, DHI Water and Environment*, page 88.
- Moussa, R. & Bocquillon, C. (1996). Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology* 186, 1-4:1–30.
- Moussa, R. & Bocquillon, C. (2000). Approximation zones of the saint-venant equations for flood routing with overbank flow. *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 2:251–261.
- Moussa, R. & Bocquillon, C. (2009). On the use of the diffusive wave for modelling extreme flood events with overbank flow in the floodplain. *Journal of Hydrology* 374, pages 116–135.
- Neil M., H., Matthew S., H., Paul D., B., Matthew D., W., & Micha G.F., W. (2005). An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. *Advances in Water Resources*, 28:975–991.
- Neil M., H., Paul D., B., Matthew S., H., & Matthew D., W. (2007). Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review. *Science Direct, Geomorphology* 90, 387:208–225.
- Newell, A. & Simon, H. (1963). Gps, a program that simulates human thought. *Computers and Thought*, 226:279–293.
- Ogden, F. (2000). Casc2d reference manual. *Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut: Storrs, CT.*, Version 2.0:255–275.
- Ogden, F. & Julien, P. (2002). Casc2d: a two-dimensional, physically-based, hortonian, hydrologic model. *In: Singh, V.J., Freverts, D. (Eds.), Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*, pages 69–112.
- Ortega, G. & García, C. (s.f). Estudio de algoritmos de planificación en ia. Master's thesis, Universidad Pontifica de Salamanca Campus de Madrid.

- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in hec-ras using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302:46–69.
- Paul D., B., Matthew, S. H., & Timothy, J. F. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387:33–45.
- Pednault, E. (1989). Adl: exploring the middle ground between strips and the situation calculus. *Proceedings of the first international conference on Principles of knowledge representation and reasoning*, pages 324–332.
- Penberthy, J. & Weld, D. (1992). Ucpop: A sound, complete, partial order planner for adl. *Proceedings of the 3rd International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, 52:103–114.
- Peot, M. & Smith, D. (1992). Conditional nonlinear planning. *Proceedings of the Conference on AI Planning Systems (AIPS)*, pages 189–197.
- Pisano, F. (2005). Humanitarian practice network - using satellite imagery to improve emergency relief. <http://www.odihpn.org/report.asp?id=2770>. Issue 32 - December 2005. Consultada en junio de 2011.
- Plate, E. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology* 267, pages 2–11.
- Ponce, V. (1990). Generalized diffusive wave equation with inertial effects. *Water Resources Research* 26, 5:1099–1101.
- Ponce, V. & Simons, D. (1977). Shallow wave propagation in open channel flow. *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers* 103 (HY12), pages 1461–1476.
- Preissmann, A. (1961). Propagation des intumescences dans les canaux et rivières. *Proceedings of the First Congress of the French Association for Computation, Grenoble, France*, pages 433–42.
- Protección Civil , C. A. (Consultada en junio de 2011). Sistema hidrológico. <http://www.cpe.gba.gov.ar/index.php>.
- Radarsat International (1995). *RADARSAT Illuminated - Your Guide to Products and Services*. Version 07/95.
- Rich, E. & Knight, K. (1991). Introduction to artificial intelligence. *McGraw-Hill*.
- Romanowicz, R. & Beven, K. (1997). Dynamic real-time prediction of flood inundation probabilities. *Hydrological Sciences Journal* 43, 43:181–196.
- Romanowicz, R. & Beven, K. (2003). Estimation of flood inundation probabilities as conditioned on event inundation maps. *Water Resources Research* 39, 3:1061–1073.
- Romanowicz, R., Beven, K., & Tawn, J. (1994). Evaluation of predictive uncertainty in nonlinear hydrological models using a bayesian approach. In: *Barnett, V., Turkman, F. (Eds.), Statistics for the Environment (2)*, 3:297–318.

- Romanowicz, R., Beven, K., & Tawn, J. (1996). Bayesian calibration of flood inundation models. *In: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.), Floodplain Processes. Wiley, Chichester*, pages 333–360.
- Russell Stuart, J. & Norvig, P. (2004). Libro: Inteligencia artificial - un enfoque moderno. *Cap 1*.
- Sacerdoti, E. (1975). The nonlinear nature of plans. *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (AI)*, pages 206–214.
- Saint-Venant, B. (1871). Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lits. *Comptes rendus des séances de l'Academie des Sciences*, 73:148–154,237–240.
- Samuels, P. (1990). Cross-section location in 1-d models. *2nd International Conference on River Flood Hydraulics. Wiley, Chichester*, pages 339–350.
- Singh, V. (1994). Accuracy of kinematic wave and diffusion wave approximations for space-independent flows. *Hydrological Processes*, 8:45–62.
- Smith, L. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage and discharge: a review. *Hydrological Processes* 11, 10:1427–1439.
- Smith, M., Seo, D., Koren, V., Reed, S., Zhang, Z., Duan, Q., Moreda, F., & Cong, S. (2004). The distributed model intercomparison project (dmip): motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 298 (1-4):4–26.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., & Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, 5:81–100.
- Turbides, T. d. l. R. (2009). *Tesis Doctoral: Razonamiento Basado en Casos Aplicado a la Planificación Heurística*. PhD thesis, UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID: Escuela Politécnica Superior.
- Vasquez, M. & Hao, J. (2001). A logic-constrained knapsack formulation and a tabu algorithm for the daily photograph scheduling of an earth observation satellite. *Journal of Computational Optimization and Applications*, 6:137–157.
- Vazquez, P., Masuelli, S., Platzeck, G., & Barrera, D. (Septiembre de 2006). Modelo hidrológico con uso intensivo de información satelital para la subcuenca b4 del río salado bonaerense. *XII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica - SELPER*. Capítulo Colombia. Memorias del Congreso.
- Veloso, M., Pollack, M., & Cox, M. (1998). Rationale-based monitoring for planning in dynamic environments. *In Proceedings of AIPS'98*, AAAI Press:171–179.
- Venere, M. & Clausse, A. (2002). A computational environment for water flow along floodplains. *International Journal of Computational Fluid Dynamics* 16, 4:327–330.

- Wilkins, D. (1988). Practical planning: Extending the classical ai planning paradigm. *Morgan Kaufmann*.
- Wolfe, W. & Sorensen, S. (2000). Sorensen, three scheduling algorithms applied to the earth observing systems domain. *Management Science*, 46:148–168.
- Xanthopoulos, T. & Koutitas, C. (1976). Numerical-simulation of a 2 dimensional flood wave-propagation due to dam failure. *Journal of Hydraulic Research* 14, 4:321–331.
- Yalin, M. (1971). Theory of hydraulic models. *London: Macmillan*, page 266.
- Zanobetti, D., Longéré, H., Preissmann, A., & Cunge, J. (1970). Mekong delta mathematical model program construction. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Waterways and Harbors Division*, 96 (WW2):181–199.
- Zanobetti, D., Lorgeré, H., Preissmann, A., & Cunge, J. (1968). Le modèle mathématique du delta du mékong. *La Houille Blanche* 23, 1:4–5.
- Zhang, W. & Cundy, T. (1989). Modeling of two-dimensional overland-flow. *Water Resources Research* 25, 9:2019–2035.

A

Anexo

A.1. Dominio y Problema en PDDL

Se presenta una versión de dominio y problema de planificación en el lenguaje PDDL 2.1 utilizados en la solución de los escenarios de prueba. En este caso se presentan los usados en la subsección 3.6.1.

Especificación del dominio de planificación

```
(define (domain satellite6bis)
  (:requirements :typing :fluents
    :negative-preconditions
    :disjunctive-preconditions
    :equality :universal-preconditions
    :conditional-effects)

  (:types
    image - object
    modo - object
    modoGlobal - object
    region - object
    dia - object
  )

  (:predicates
    (is_selected ?ima - image)
    (empty ?d - dia)
    (check ?j - image)
    (tupla ?i - image ?m - modo

    ?s - modoGlobal ?r - region)
    (at ?i - image ?d - dia)
    (same_dia ?di - dia ?dj - dia)
    (ultima ?i - image)
  )

  (:functions
    (timeStart ?ima - image)
    (timeEnd ?ima - image)
    (area ?i - image)
    (target_in_image ?i)
    (total_area)
    (time_set ?m1 ?m2 - modo)
    (priority_mode ?m - modo)
    (priority_region ?r - region)
    (total_set_time)
    (total_target_in_image)
    (total_images)
    (total_priority_modes)
    (total_priority_region)
```

```

(mode_max)
(images_checked)
(count_images_select)
)

(:action tomar_primera_imagen_dia
:parameters (?i - image ?m - modo
?s - modoGlobal ?r - region ?d - dia)
:precondition (and (empty ?d)
(not (is_selected ?i))
(tupla ?i ?m ?s ?r)
(at ?i ?d)
)
:effect (and (not (empty ?d))
(is_selected ?i)
(check ?i)
(increase (total_area) (- 100 (area ?i)))
(increase (total_priority_region)
( * (priority_region ?r) ( - 100 (area ?i) )))
(increase (total_set_time) 2)
(increase (total_target_in_image)
( - 100 (target_in_image ?i)))
(increase (total_priority_modes)
(/ (priority_mode ?m) (mode_max)))
(increase (images_checked) 1)
(increase (count_images_select) 1)
(ultima ?i)
)
)

(:action tomar_sig_imagen_dia_1
:parameters (?i - image ?mi - modo
?si - modoGlobal ?ri - region
?di - dia ?j - image ?mj - modo
?sj - modoGlobal ?rj - region ?dj - dia)
:precondition (and (is_selected ?i)
(ultima ?i)
(not (check ?j))
(not (is_selected ?j))
( >= (timeStart ?i)
( + (timeEnd ?j) (time_set ?mi ?mj) ))
)
)

(tupla ?j ?mj ?sj ?rj)
(tupla ?i ?mi ?si ?ri)
(same_dia ?di ?dj)
(at ?j ?dj)
(at ?i ?di)
)
:effect
(and (is_selected ?j)
(ultima ?j)
(not (ultima ?i))
(increase (total_area) (- 100 (area ?j)))
(check ?j)
(increase (total_set_time) (time_set ?mi ?mj))
(increase (total_priority_region)
( * (priority_region ?rj) ( - 100 (area ?j) )))
(increase (total_target_in_image)
( - 100 (target_in_image ?j)))
(increase (total_priority_modes)
(/ (priority_mode ?mj) (mode_max)))
(increase (images_checked) 1)
(increase (count_images_select) 1)
(forall (?z - image)
(when (and (not (is_selected ?z))
(at ?z ?di)
(not ( < (timeEnd ?i) (timeStart ?z)))
(not ( < (timeEnd ?z) (timeStart ?i))))
)
)
)
)
)

(:action tomar_sig_imagen_dia_2
:parameters (?i - image ?mi - modo
?si - modoGlobal ?ri - region
?di - dia ?j - image ?mj - modo
?sj - modoGlobal ?rj - region ?dj - dia)
:precondition (and (is_selected ?i)
(ultima ?i)
(not (check ?j))
(not (is_selected ?j))
)
)
)

```

```

( >= (timeStart ?j)
  ( + (timeEnd ?i) (time_set ?mi ?mj)))
(tupla ?j ?mj ?sj ?rj)
(tupla ?i ?mi ?si ?ri)
(same_dia ?di ?dj)
(at ?j ?dj)
(at ?i ?di)
)
:effect
  (and (is_selected ?j)
    (ultima ?j)
    ( not (ultima ?i))
    (increase (total_area) (- 100 (area ?j)))
    (check ?j)
    (increase (total_set_time) (time_set ?mi ?mj))
    (increase (total_priority_region)
      ( * (priority_region ?rj)
        ( - 100 (area ?j))))
    (increase (total_target_in_image)
      ( - 100 (target_in_image ?j)))
    (increase (total_priority_modes)
      (/ (priority_mode ?mj) (mode_max)))
    (increase (images_checked) 1)
    (increase (count_images_select) 1)
    (forall (?z - image)
      (when (and (not (is_selected ?z))
        (at ?z ?di)
        (not ( < (timeEnd ?i) (timeStart ?z)))
        (not ( < (timeEnd ?z) (timeStart ?i))))
        )
      (check ?z))
    )
  )
)

(:action no_tomar_imagen_dia_1
:parameters (?i - image ?mi - modo
?si - modoGlobal ?ri - region
?di - dia ?j - image ?mj - modo
?sj - modoGlobal ?rj - region ?dj - dia)
:precondition (and (is_selected ?i)
  (not (is_selected ?j))
  (ultima ?i)
  ( <= (timeStart ?i) (timeEnd ?j))
  ( <= (timeStart ?j) (timeStart ?i))
  (tupla ?j ?mj ?sj ?rj)
  (same_dia ?di ?dj)
  (at ?j ?dj)
  (at ?i ?di)
  (not (check ?j))
  )
:effect (and (increase (images_checked) 1)
  (increase (total_area) 100)
  (increase (total_target_in_image) 100)
  (increase (total_priority_modes) 1.5)
  (increase (total_priority_region)
    ( * (total_images) 100 ))
  (check ?j)
  )
)

(:action no_tomar_imagen_dia_2
:parameters (?i - image ?mi - modo
?si - modoGlobal ?ri - region
?di - dia ?j - image ?mj - modo
?sj - modoGlobal ?rj - region ?dj - dia)
:precondition (and (is_selected ?i)
  (not (is_selected ?j))
  (ultima ?i)
  ( <= (timeStart ?i) (timeEnd ?j))
  ( <= (timeStart ?j) (timeStart ?i))
  (tupla ?j ?mj ?sj ?rj)
  (same_dia ?di ?dj)
  (at ?j ?dj)
  (at ?i ?di)
  (not (check ?j))
  )
:effect (and (increase (images_checked) 1)
  (increase (total_area) 100)
  (increase (total_target_in_image) 100)
  (increase (total_priority_modes) 1.5)
  (increase (total_priority_region)
    ( * (total_images) 100 ))
  (check ?j)
  )
)

```

```

( * (total_images) 100 ))
(check ?j)
)
)

(:action no_tomar_imagen_dia_3
:parameters (?i - image ?mi - modo
?si - modoGlobal ?ri - region
?di - dia ?j - image ?mj - modo
?sj - modoGlobal ?rj - region ?dj - dia)
:precondition (and (is_selected ?i)
(not (is_selected ?j))
(ultima ?i)
( <= (timeStart ?j) (timeStart ?i))
( <= (timeEnd ?i) (timeEnd ?j))
(tupla ?j ?mj ?sj ?rj)
(same_dia ?di ?dj)
(at ?j ?dj)
(at ?i ?di)
(not (check ?j))
)
:effect (and (increase (images_checked) 1)
(increase (total_area) 100)
(increase (total_target_in_image) 100)
(increase (total_priority_modes) 1.5)
(increase (total_priority_region)
( * (total_images) 100 ))
(check ?j)
)
)

( * (total_images) 100 ))
)
)

(:action no_tomar_imagen_dia_4
:parameters (?i - image ?mi - modo
?si - modoGlobal ?ri - region
?di - dia ?j - image ?mj - modo
?sj - modoGlobal ?rj - region ?dj - dia)
:precondition (and (is_selected ?i)
(not (is_selected ?j))
(ultima ?i)
( <= (timeStart ?i) (timeStart ?j))
( <= (timeEnd ?j) (timeEnd ?i))
(tupla ?j ?mj ?sj ?rj)
(same_dia ?di ?dj)
(at ?j ?dj)
(at ?i ?di)
(not (check ?j))
)
:effect (and (increase (images_checked) 1)
(increase (total_area) 100)
(increase (total_target_in_image) 100)
(increase (total_priority_modes) 1.5)
(increase (total_priority_region)
( * (total_images) 100 ))
(check ?j)
)
)
)

```

Especificación del problema de planificación

```

(define (problem problema7)
  (:domain satellite6bis)
  (:objects iF6N_Cuenca_Baja_0_0 - image
            iF6N_Cuenca_Baja_0 - image
            iEH2_Cuenca_Baja_0_0 - image
            iEH2_Cuenca_Baja_0 - image
            iEH4_Cuenca_Baja_0_0 - image
            iEH4_RECT_S24_W60_K156_0 - image
            iEH6_Cuenca_Baja_0 - image
            iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0 - image
            rCUENCA_BAJA - region
            mF6N - modo
            mEH2 - modo
            mEH4 - modo
            mEH6 - modo
            MFine - modoGlobal
            MExtended_High - modoGlobal
            d2011_6_7 - dia
            d2011_6_10 - dia
            )
  (:init ( = (total_images) 8)
         ( = (total_area) 0)
         ( = (total_set_time) 0)
         ( = (total_priority_modes) 0)
         ( = (mode_max) 4)
         ( = (total_target_in_image) 0)
         ( = (tiempo_skip) 0)
         ( = (images_checked) 0)
         ( = (total_priority_region) 0)
         ( = (count_images_select) 0)

         ( = (area iF6N_Cuenca_Baja_0_0) 14.85)
         ( = (timeStart iF6N_Cuenca_Baja_0_0) 38216)
         ( = (timeEnd iF6N_Cuenca_Baja_0_0) 38258)
         ( = (target_in_image iF6N_Cuenca_Baja_0_0) 67.45)
         (tupla iF6N_Cuenca_Baja_0_0 mF6N
                MFine rCUENCA_BAJA)
         (at iF6N_Cuenca_Baja_0_0 d2011_6_7)

         ( = (area iF6N_Cuenca_Baja_0) 8.46)
         ( = (timeStart iF6N_Cuenca_Baja_0) 247689)
         ( = (timeEnd iF6N_Cuenca_Baja_0) 247710)
         ( = (target_in_image iF6N_Cuenca_Baja_0) 75.69)
         (tupla iF6N_Cuenca_Baja_0 mF6N
                MFine rCUENCA_BAJA)
         (at iF6N_Cuenca_Baja_0 d2011_6_10)

         ( = (area iEH2_Cuenca_Baja_0_0) 11.27)
         ( = (timeStart iEH2_Cuenca_Baja_0_0) 38206)
         ( = (timeEnd iEH2_Cuenca_Baja_0_0) 38239)
         ( = (target_in_image iEH2_Cuenca_Baja_0_0) 40.93)
         (tupla iEH2_Cuenca_Baja_0_0 mEH2
                MExtended_High rCUENCA_BAJA)
         (at iEH2_Cuenca_Baja_0_0 d2011_6_7)

         ( = (area iEH2_Cuenca_Baja_0) 10.42)
         ( = (timeStart iEH2_Cuenca_Baja_0) 247683)
         ( = (timeEnd iEH2_Cuenca_Baja_0) 247697)
         ( = (target_in_image iEH2_Cuenca_Baja_0) 85.06)
         (tupla iEH2_Cuenca_Baja_0 mEH2
                MExtended_High rCUENCA_BAJA)
         (at iEH2_Cuenca_Baja_0 d2011_6_10)

         ( = (area iEH4_Cuenca_Baja_0_0) 13.34)
         ( = (timeStart iEH4_Cuenca_Baja_0_0) 38187)
         ( = (timeEnd iEH4_Cuenca_Baja_0_0) 38222)
         ( = (target_in_image iEH4_Cuenca_Baja_0_0) 51.19)
         (tupla iEH4_Cuenca_Baja_0_0 mEH4
                MExtended_High rCUENCA_BAJA)
         (at iEH4_Cuenca_Baja_0_0 d2011_6_7)

         ( = (area iEH4_RECT_S24_W60_K156_0) 10.47)
         ( = (timeStart iEH4_RECT_S24_W60_K156_0) 247675)
         ( = (timeEnd iEH4_RECT_S24_W60_K156_0) 247698)
         ( = (target_in_image iEH4_RECT_S24_W60_K156_0) 60.82)
         (tupla iEH4_RECT_S24_W60_K156_0 mEH4
                MExtended_High rCUENCA_BAJA)
         (at iEH4_RECT_S24_W60_K156_0 d2011_6_7)
  )

```

```

MExtended_High rCUENCA_BAJA)                ( = (time_set mEH2 mEH2) 0)
(at iEH4_RECT_S24_W60_K156_0 d2011_6_10)    ( = (time_set mEH2 mEH4) 3)
                                                ( = (time_set mEH4 mEH2) 3)
( = (area iEH6_Cuenca_Baja_0) 19.78)         ( = (time_set mEH2 mEH6) 3)
( = (timeStart iEH6_Cuenca_Baja_0) 38165)    ( = (time_set mEH6 mEH2) 3)
( = (timeEnd iEH6_Cuenca_Baja_0) 38213)
( = (target_in_image iEH6_Cuenca_Baja_0) 54.89) ( = (time_set mEH4 mEH4) 0)
(tupla iEH6_Cuenca_Baja_0 mEH6)             ( = (time_set mEH4 mEH6) 3)
MExtended_High rCUENCA_BAJA)                ( = (time_set mEH6 mEH4) 3)
(at iEH6_Cuenca_Baja_0 d2011_6_7)           ( = (time_set mEH6 mEH6) 0)

( = (area iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0) 7.82)    ( = (priority_mode mF6N) 1)
( = (timeStart iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0) 247676) ( = (priority_mode mEH2) 1)
( = (timeEnd iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0) 247691) ( = (priority_mode mEH4) 1)
( = (target_in_image iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0) 69.41) ( = (priority_mode mEH6) 1)
(tupla iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0 mEH6)
MExtended_High rCUENCA_BAJA)                ( = (priority_region rCUENCA_BAJA) 1)
(at iEH6_Cuenca_Baja_0_0_0_0 d2011_6_10)

                                                (empty d2011_6_7)
( = (time_set mF6N mF6N) 0)                  (same_dia d2011_6_7 d2011_6_7)
( = (time_set mF6N mEH2) 3)                  (empty d2011_6_10)
( = (time_set mEH2 mF6N) 3)                  (same_dia d2011_6_10 d2011_6_10)
( = (time_set mF6N mEH4) 3)                  )
( = (time_set mEH4 mF6N) 3)                  (:goal ( = (images_checked) (total_images) ))
( = (time_set mF6N mEH6) 3)                  (:metric minimize (total_area) )
( = (time_set mEH6 mF6N) 3)                  )

```

A.2. Heurísticas

El éxito de la planificación heurística radica en la posibilidad de construir funciones heurísticas independientes del dominio de forma automática. La idea original de (McDermott, 1996) consiste en plantear una tarea de planificación simplificada en la que no se consideran los borrados de las acciones del dominio.

De esta forma, a partir de un problema de planificación $P = (L, A, I, G)$ se puede definir un problema relajado $P' = (L, A^+, I, G)$ en donde A^+ es el conjunto de acciones relajadas a^+ y

$$a^+ = (pre(a), add(a)) \text{ para cada } a \in A$$

Dado que el cálculo de las funciones heurísticas se realiza para cada nodo en el proceso de búsqueda, se asume que el estado I pasa a ser el estado actual de la búsqueda, en el sentido de que el problema relajado se resuelve partiendo del estado actual hasta conseguir las metas. Por eso, se redefine el problema relajado

$P' = (L, A^+, S, G)$ con S como estado actual de la búsqueda. Las diferentes aproximaciones para resolver este problema relajado dan como resultado diferentes heurísticas.

A.2.1. Heurística del Plan Relajado

La heurística del plan relajado fue introducida en el planificador FF (Hoffmann & Nebel, 2001). La heurística consiste en resolver el problema relajado P' con el algoritmo del planificador GRAPHPLAN (Blum & Furst, 1995) y tomar como estimación heurística la longitud del plan encontrado. El algoritmo de GRAPHPLAN queda muy simplificado a la hora de aplicarse al problema relajado porque no tiene que considerar los conflictos en el grafo de planificación, llamados *mutex*. Como en este trabajo interesa el GRAPHPLAN como estimador heurístico, sólo se describirá la versión simplificada del algoritmo.

El algoritmo para obtener el plan relajado consta de dos fases. La primera es la expansión del grafo relajado de planificación y la segunda la extracción del plan relajado a partir del grafo. El grafo de planificación se representa mediante una secuencia $P_0, A_0, \dots, P_{t-1}, A_{t-1}, P_t$ en donde cualquier capa i del grafo esta formada por P_i , un conjunto de proposiciones y por A_i , un conjunto de acciones. Cada capa se construye de forma incremental empezando por $P_0 = S$ como la primera capa de proposiciones, y A_0 como la capa que contiene las acciones aplicables en el estado S . Después, de forma iterativa, se inserta una nueva capa con los añadidos de todas las acciones de la capa anterior y el conjunto de acciones que pasan a ser aplicables. El algoritmo falla si en un determinado punto antes de alcanzar la metas no se pueden insertar más proposiciones. En este caso no existe solución al problema relajado y la estimación heurística se indica como ∞ . La figura A.1 muestra el algoritmo para la expansión del grafo de planificación (Turbides, 2009).

```

Expansion_RPG ( $G, S, A$ ):  $RPG$ 


---


 $G$ : Metas
 $S$ : Estado actual
 $A$ : Acciones


---


 $t = 0$ ;  $P_0 = S$ 
while  $G \not\subseteq P_t$  do
   $A_t = \{a \in A \mid prec(a) \subseteq P_t\}$ 
   $P_{t+1} = P_t \cup add(a), \forall a \in A_t$ 
  if  $P_{t+1} = P_t$  then
    return "fallo"
   $t = t + 1$ 
return [ $P_0, A_0, \dots, A_{t-1}, P_t$ ]

```

Figura A.1: Algoritmo para la expansión del grafo de planificación relajado

Para la extracción del plan relajado se sigue el algoritmo mostrado en la figura A.4. Primero, las metas en G se separan como conjuntos de metas G_i en donde cada meta g_i debe conseguirse en la capa P_i del grafo (P_i es la primera capa donde aparece g_i). El proceso comienza por la última capa y en cada capa i se selecciona por cada meta en G_i una acción de la capa A_{i-1} que consiga ese hecho. Si existe más de una acción que consigue un hecho, se selecciona la que tenga menor dificultad en las precondiciones de las acciones. Hoffmann explica esta selección como la heurística de la dificultad, que es la base para la función heurística explicada en la siguiente

```

Extraccion-plan-relajado ( $G, RPG$ ): plan-relajado


---


 $G$ : Metas
 $RPG$ : Grafo de planificación relajado


---


 $PR \leftarrow []$ ,  $m \leftarrow \text{numero-capas}(RPG)$ 
for  $i = 1 \dots m$  do
   $G_i = \{g \in G \mid \text{capa}(g) = i\}$ 
for  $i = m \dots 1$  do
  for all  $g \in G_i$  do
     $a \leftarrow$  accion en  $RPG$  con  $g \in \text{add}(a)$  y  $\text{diff}(a)$  mínima
    for all  $f \in \text{pre}(a)$ ,  $\text{capa}(f) \neq 0$  do
       $G_{\text{capa}(f)} \leftarrow G_{\text{capa}(f)} + f$ 
       $G_i \leftarrow G_i - \text{add}(a)$ 
       $G_{i-1} \leftarrow G_{i-1} - \text{add}(a)$ ; **interacciones positivas**
       $PR \leftarrow PR + a$ 
return  $PR$ 

```

Figura A.2: Algoritmo para la extracción del plan relajado

sección. Después, las precondiciones de la acción seleccionada se introducen en el conjunto de metas de su capa correspondiente. Cada vez que se selecciona una acción, sus añadidos se eliminan (en caso de que existan) de las metas en G_i y G_{i-1} , para que éstas ya no tengan que producir nuevas selecciones de acciones que las consigan. Este detalle permite tomar en cuenta las interacciones positivas entre las acciones, de modo que no haya más acciones de las necesarias en el plan relajado, sino el conjunto adecuado correctamente ordenado. Sin embargo, decidir la ordenación óptima es un problema NP-completo y aquí lo que interesa es obtener una solución rápida para calcular el valor heurístico. El orden arbitrario de la resolución de metas dentro de una misma capa y la heurística de la dificultad son estrategias para extraer rápidamente un plan relajado. Hoffmann & Nebel (2001) probaron que este algoritmo podía encontrar una solución al problema relajado sin un punto de retroceso (*backtracking*) en la búsqueda sobre el grafo relajado (Turbides, 2009).

La heurística de la dificultad es el criterio para seleccionar una acción de entre varias posibilidades durante la extracción del plan relajado. Este caso se da si en el momento de resolver una meta o sub-meta g , existen al menos una a_1 y una a_2 tal que $g \in \text{add}(a_1)$ y $g \in \text{add}(a_2)$. La heurística consiste en preferir la acción que tenga la menor dificultad en las precondiciones. Esta dificultad se determina en función de la primera capa en la que aparece cada precondición, y se calcula con la fórmula:

$$\text{dificultad}(a) = \sum_{p \in \text{prec}(a)} \min\{i \mid p \in P_i\} \quad (\text{A.1})$$

Después de la extracción del plan relajado se obtiene el valor para la función heurística del plan relajado, que resulta de contar el número de acciones que se encuentren en el plan relajado. Formalmente, considerando la secuencia de acciones $P^+ = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ como el plan que resuelve del problema relajado $P' = (L, A^+, S, G)$ a partir de un estado S , la función heurística del plan relajado o bien la heurística de FF se obtiene por

$$h^{FF}(S) = |P^+| \quad (\text{A.2})$$

La longitud del plan óptimo para P' es una heurística admisible para el problema original, pero como ya se ha dicho, obtener el plan óptimo durante el proceso de extracción del plan es un problema NP-duro. La aproximación utilizada para extraer rápidamente un plan relajado hace que la heurística sea no admisible.

A.3. Algoritmos “Primero el mejor” y “Escalada”

Procedure Best-first (Initial-state,Final-state)

```
Create a search tree  $T$ , with the initial node,  $I$  (Initial-state)
OPEN={ $I$ }, CLOSED= $\emptyset$ , OUTCOME=False
Until OPEN is empty or OUTCOME is true
  Remove the first node in OPEN,  $N$ , and place it in CLOSED
  If  $N$  is Final-state then OUTCOME=True
  Else Expand  $N$ , generating the set  $S$  of the successors of  $N$ ,
    that are not predecessors of  $N$  in the graph
    Generate a node in  $T$  and establish a pointer to  $N$  for every  $s \in S, s \notin T$ 
    Add them to OPEN
    Sort OPEN according to  $f(n)$ 
    Remove repeated nodes from OPEN and move them to CLOSED
If OUTCOME then Solution=path from  $I$  to  $N$  traversing the pointers in  $T$ 
Else Solution=Failure
```

Figura A.3: Pseudocódigo del algoritmo “primero el mejor”

Procedure hill-climbing (Initial-state Final-state)

```
N=Initial-state; OUTCOME=False
Until OPEN list is empty or OUTCOME
  Generate the successors of N
  If a successor is the Final-state
  Then OUTCOME=True
  Else Evaluate each node with the evaluation function,  $f(n)$ 
    N=best successor
If OUTCOME
Then Solution=path from the node of the Initial-state
  to the node pointed by N
Else Solution=Failure
```

Figura A.4: Pseudocódigo del algoritmo “escalada”