



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



**DESARROLLO DE UNA ARQUITECTURA CONCEPTUAL PARA UN SISTEMA DE ALERTA
TEMPRANA DE FLORACIONES ALGALES NOCIVAS EN LA PATAGONIA CHILENA
UTILIZANDO EL ENFOQUE DE INGENIERÍA DE SISTEMAS BASADA EN MODELOS**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica

POR: FELIPE IGNACIO ZURITA HENRÍQUEZ
Profesor Guía: PABLO EDUARDO CORNEJO OLIVARES

Concepción, Chile 2023

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Resumen

La industria acuícola está aumentando su producción e importancia como fuente de alimentos nutritivos a escala mundial, y es poco probable que esta tendencia se detenga o disminuya. Sin embargo, el sector acuícola debe abordar dos problemáticas principales para seguir desarrollándose de manera sostenible: necesita reducir su impacto ambiental y necesita reducir su alta vulnerabilidad a diversos factores, entre los que se incluye la variabilidad natural de los ecosistemas y el cambio climático. El cambio climático constituye una de las mayores amenazas para la producción acuícola, ya que los ecosistemas acuáticos se enfrentarán a un aumento de la temperatura del agua, una disminución del pH y del oxígeno, fluctuaciones de la salinidad y una mayor frecuencia de fenómenos extremos como las floraciones algales nocivas (FAN's). El término FAN es muy amplio y abarca floraciones de muchos tipos, pero todas las FAN's tienen una característica común: generan efectos adversos, sobre los peces en cultivo en particular, mediante la producción de toxinas ictiotóxicas, o daño mecánico en las agallas, entre otros, y sobre el ecosistema en general. Las FAN's han causado mortandades masivas de peces en cultivo en la zona sur de Chile, y el manejo de esta biomasa en descomposición ha generado un intenso debate sobre el daño ambiental asociado a estas acciones.

Frente a esta problemática, se plantea como objetivo el desarrollo de una arquitectura conceptual de un sistema que entregue una estimación del riesgo de posibles afloramientos algales a las empresas acuícolas, en un periodo de tiempo suficiente para que estas puedan reaccionar a modo de minimizar los daños. Para la consecución de dicho objetivo, se utilizó la metodología ARCADIA (*Architecture Analysis and Design Integrated Approach*), en conjunto con la herramienta de modelado Capella. Mediante un trabajo iterativo e investigativo, se desarrolló una arquitectura conceptual capaz de entregar un marco general para el desarrollo de sistemas de alerta temprana de floraciones algales nocivas, proporcionando así un punto de partida para un potencial usuario u organización que desee desarrollar su propio sistema.

La arquitectura conceptual considera un sistema de gestión de sensores compuesto por cinco subsistemas y ocho funciones de alto nivel encargadas de satisfacer capacidades relacionadas a la gestión del flujo de datos y la sincronización espacio-temporal de los sensores. Se destacan tres actores externos al sistema: operador de sistema, sensores y sitio de interés (fiordo Comau). Cada uno de los actores cuenta con su propio conjunto de funciones y trabaja en combinación con el sistema de interés para generar la propiedad emergente de alerta temprana. Cabe recalcar que, al no formar parte del sistema en sí, los actores son fácilmente intercambiables por el usuario de la arquitectura conceptual. Esta es una decisión de diseño fundamentada en entregar mayor flexibilidad para cambiar dichos actores según cada necesidad particular, además que permite asegurar un mayor rango de soluciones para el problema.

Se espera que trabajos futuros utilicen la arquitectura conceptual propuesta, y continúen con la última fase de la metodología ARCADIA, conocida como arquitectura física, en la que se debe definir en detalle cómo debe construirse el sistema para guiar la integración, verificación y validación de este.

Palabras claves: floraciones algales nocivas, arquitectura conceptual, ingeniería sistémica, MBSE, ARCADIA

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Identificación y cuantificación del problema/oportunidad	1
1.2 Revisión bibliográfica o estado del arte	4
1.3 Solución propuesta	7
1.4 Hipótesis y objetivos.....	8
1.4.1 Hipótesis	8
1.4.2 Objetivos.....	8
1.5 Metodología	8
CAPÍTULO 2	11
2 BASES DE LA INGENIERÍA SISTÉMICA	11
2.1 <i>Systems Engineering</i>	11
2.2 <i>Model-based systems engineering</i>	13
2.3 Principales tipos de diagramas en Arcadia.....	16
2.3.1 Diagramas de flujo de datos.....	16
2.3.2 Diagramas de arquitectura	16
2.3.3 Diagramas de descomposición	17
2.3.4 Diagramas de capacidades.....	17
CAPÍTULO 3	18
3 ANÁLISIS OPERATIVO	18
3.1 Definiciones previas y objetivos del análisis operativo.....	18
3.2 Desarrollo del análisis operativo en Capella.....	19
3.2.1 Definición de entidades y capacidades operativas	19
3.2.2 Definición de arquitectura operativa	20
CAPÍTULO 4	23
4 ANÁLISIS DEL SISTEMA.....	23
4.1 Definiciones previas y objetivo del análisis del sistema	23
4.2 Desarrollo del análisis del sistema en Capella.....	24
4.2.1 Identificación de actores y definición de capacidades del sistema	24
4.2.2 Definición de funciones del sistema	26
4.2.3 Integración final del análisis del sistema.....	29
CAPÍTULO 5	31
5 ARQUITECTURA LÓGICA.....	31

5.1	Definiciones previas y objetivos de la arquitectura lógica	31
5.2	Desarrollo de la arquitectura lógica en Capella	32
CAPÍTULO 6		38
6	CONCLUSIONES.....	38
Bibliografía		39

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de variables críticas que caracterizan un fenómeno de floración algal de especies nocivas.....	7
Tabla 2. Conceptos del análisis operativo.....	18
Tabla 3. Conceptos del análisis del sistema.....	23
Tabla 4. Funciones de control de flujo.....	27
Tabla 5. Conceptos de la arquitectura lógica.....	31

Índice de Figuras

Figura 1. Crecimiento de la producción de peces de cultivo asumiendo una tasa de crecimiento lineal de 2 millones de toneladas por año.....	1
Figura 2. Pérdidas económicas asociados a eventos de FAN.....	2
Figura 3. Distribución de la cosecha de salmónidos en Chile.....	3
Figura 4. Riesgos comparativos de procesos de eutrofización (riesgo varía entre 0 y 1, donde 1 representa el riesgo máximo) en zonas de cultivo de salmón.....	3
Figura 5. Evolución espacio-temporal de FAN utilizando satélites S2 y S3 durante Febrero-Abril 2020.....	5
Figura 6. Comparativa entre satélites y <i>RPAS (UAV)</i> en el monitoreo de floraciones algales nocivas.....	6
Figura 7. Método Arcadia para diseño de arquitecturas de sistemas, hardware y software.....	9
Figura 8. Diseño de arquitectura como motor principal de la ingeniería.....	10
Figura 9. Modelos de ciclo de vida de proyecto.....	12
Figura 10. Impacto en los costos del ciclo de vida producto de cambios respecto al diseño inicial.....	13
Figura 11. Ventajas de utilizar MBSE.....	14
Figura 12. Pilares de MBSE con ARCADIA/Capella.....	15
Figura 13. Enfoque descendente para el diseño de sistemas en ARCADIA.....	15
Figura 14. Diagrama de flujo de datos.....	16
Figura 15. Diagrama de arquitectura en análisis de sistema.....	16
Figura 16. Diagrama de arquitectura en arquitectura lógica.....	17
Figura 17. Diagrama de descomposición.....	17
Figura 18. Diagrama de capacidades.....	17
Figura 19. <i>Operational Capabilities Diagram</i>	20
Figura 20. <i>Operational Architecture</i>	21
Figura 21. <i>Context System Actors</i>	24
Figura 22. <i>Capability Diagram</i>	25
Figura 23. <i>Data Management Breakdown</i>	27
Figura 24. <i>Sensor Management Breakdown</i>	28
Figura 25. <i>System Analysis Architecture</i>	29
Figura 26. <i>Logical Architecture</i>	33
Figura 27. Desglose de función de recolección de datos.....	34
Figura 28. Desglose de función de agregado de datos.....	35
Figura 29. Desglose de función de filtrado de datos.....	35
Figura 30. Desglose de función de procesamiento de datos.....	36
Figura 31. Desglose de función de envío de datos.....	37

NOMENCLATURA

Acrónimos

ARCADIA	:	<i>Architecture Analysis and Design Integrated Approach</i>
DoD	:	<i>Department of Defense</i>
EWS	:	<i>Early Warning System</i>
FAN	:	<i>Floraciones Algales Nocivas</i>
HAB	:	<i>Harmful Algal Bloom</i>
LA	:	<i>Logical Architecture</i>
MBSE	:	<i>Model-Based Systems Engineering</i>
NASA	:	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OA	:	<i>Operational Analysis</i>
SA	:	<i>System Analysis</i>
RPAS	:	<i>Remotely Piloted Aircraft System</i>

CAPÍTULO 1

En este capítulo se expondrá la problemática que justifica el desarrollo de este trabajo, una revisión del estado del arte de las soluciones más relevantes que han sido propuestas hasta la fecha para enfrentar dicha problemática, y la solución propuesta en este trabajo.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Identificación y cuantificación del problema/oportunidad

La demanda mundial por productos marinos ha crecido sostenidamente en las últimas décadas y la captura de peces de origen silvestre se ha estancado desde hace dos décadas (Naylor et al., 2021), por lo que un gran porcentaje del consumo actual y futuro a nivel mundial proviene de la acuicultura. En la Figura 1 se puede apreciar el crecimiento esperado de la industria acuícola, de la cual se resalta que para el año 2050 la producción acuícola llegará a 140 millones de toneladas, lo que representa a un crecimiento del 133% respecto a la producción del año 2010 (Waite et al., 2014).

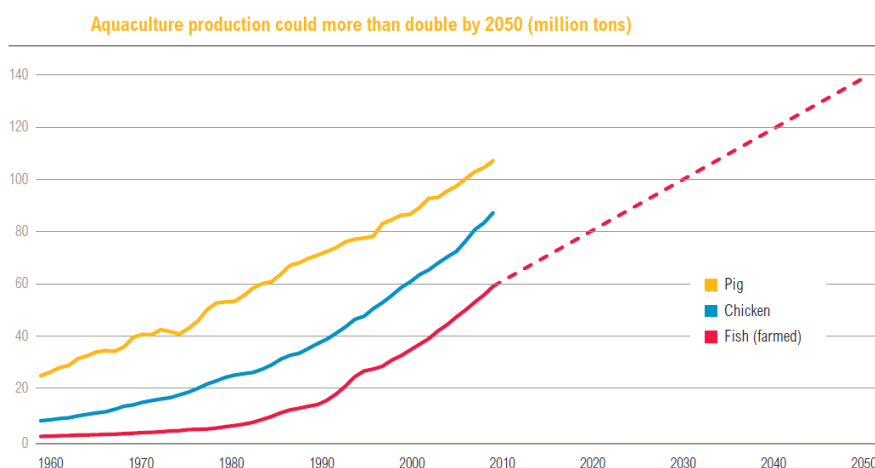


Figura 1. Crecimiento de la producción de peces de cultivo asumiendo una tasa de crecimiento lineal de 2 millones de toneladas por año. (Fuente: (Waite et al., 2014)).

En este contexto, la industria acuícola debe atender dos problemáticas principales si quiere lograr un desarrollo sostenible sostenible. Primero, necesita reducir sus efectos ambientales y de esta forma minimizar su impacto sobre los ecosistemas dentro de los cuales desarrolla su actividad. Segundo, necesita reducir su gran vulnerabilidad frente a amenazas externas tales como el cambio climático y la variabilidad climática (Soto et al., 2021). Dado que Chile se encuentra dentro de los diez principales productores acuícolas, siendo en la actualidad el segundo productor de especies salmonídeas (peces) y mitílidos (mejillones) a nivel mundial (FAO, 2019; Poblete et al., 2019; Salazar & Dresdner, 2023), se torna relevante anticiparse a eventos FAN's que han causado grandes mortalidades de peces con enormes costos sociales y económicos durante los años 2016 y 2021 ((Buschmann et al., 2016; Díaz et al., 2023; Montes et al., 2018))

Las floraciones algales nocivas causan daño a los organismos vivos mediante la producción de toxinas o bien debido al daño mecánico que producen sus estructuras celulares en las agallas de

los peces (Anderson, 2009). Los eventos FAN's se caracterizan por la proliferación acelerada de especies algales tóxicas o nocivas. Cabe destacar que hay algunas especies cuya concentración celular es baja por lo que no decoloran el agua, sin embargo, siguen causando daño debido a la potencia de sus toxinas. Varias décadas atrás, solo un puñado de países enfrentaba problemas de FAN's, pero en la actualidad prácticamente todos los países costeros se encuentran amenazados por más de una especie nociva.

En particular, la primera vez que se registró una FAN en Chile fue en el año 1972 en la región de Magallanes. Desde esa fecha, el fenómeno se ha expandido hacia las regiones de Aysén y Los Lagos, llegando a su punto más crítico el año 2016, debido a que la floración coincidió con el fenómeno de El Niño y una fase positiva del modo anular sur, que alteró la circulación atmosférica en la zona sur de Chile, propiciando aguas más salinas y ricas en nutrientes, ideales para la proliferación de algas nocivas (León-Muñoz et al., 2018). El resultado de esta crisis dejó 39.942 toneladas de salmones muertos, equivalentes a 27.000.000 de peces (Montes et al., 2018) (un 15% de la producción anual estimada para ese año), lo que se traduce en pérdidas económicas de 800 millones de dólares (Mardones et al., 2021). En la Figura 2 se presenta un resumen con las pérdidas económicas que acarrear los eventos FAN's tanto en Chile como otros países productores de salmón.

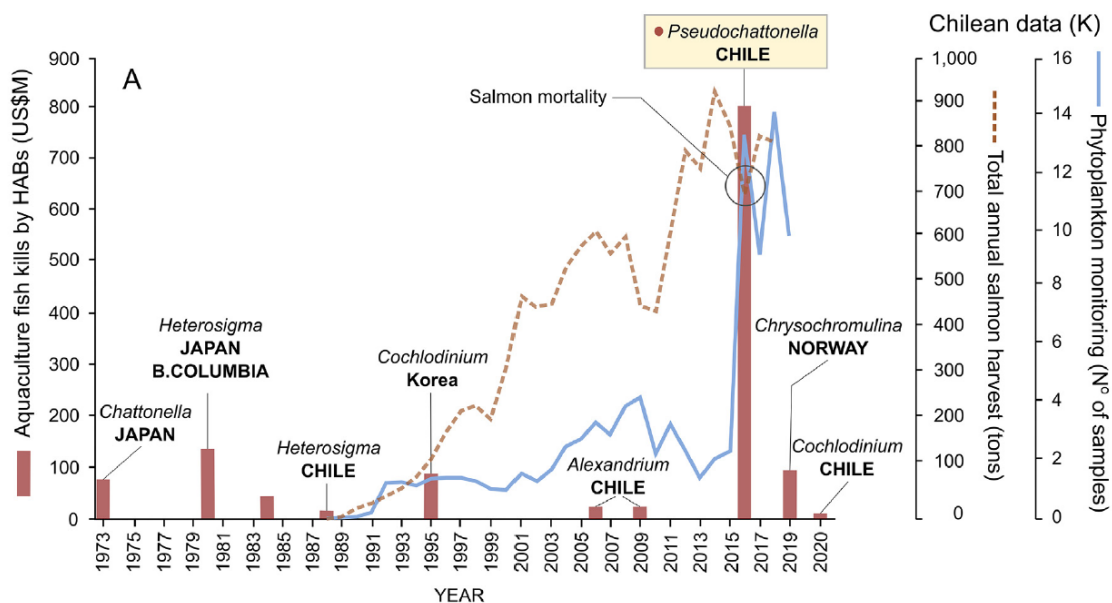


Figura 2. Pérdidas económicas asociados a eventos de FAN. (Fuente: (Mardones et al., 2021)).

La Patagonia chilena cuenta con condiciones privilegiadas para la salmicultura, siendo estas una temperatura del agua entre los 10° y 12° grados, corrientes marinas que protegen los cultivos y aguas puras, con niveles de oxígeno apropiados para la producción (Sernapesca, 2023). Producto de estas condiciones tan favorables, casi la totalidad de las cosechas de salmónidos ocurren en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. Lo anterior se puede ver gráficamente representado en la Figura 3, donde el 99.7% de las cosechas las acaparan las tres regiones mencionadas anteriormente.

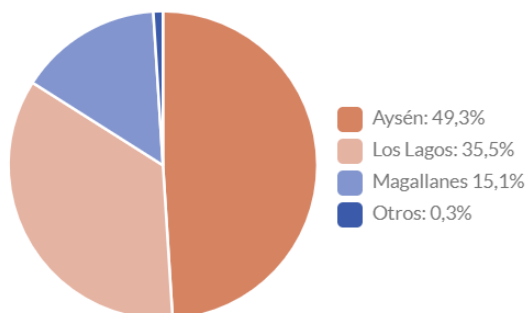


Figura 3. Distribución de la cosecha de salmónidos en Chile. (Fuente: (Sernapesca, 2023)).

Dentro de los múltiples cuerpos de agua de la Patagonia chilena se encuentra el fiordo Comau, ubicado en la región de Los Lagos, con un largo norte-sur de 68 kilómetros, un ancho que varía entre 10 (boca del fiordo) y 2 kilómetros (cabeza del fiordo), y 500 metros de profundidad a lo largo de su eje central (Mardones et al., 2022). Este fiordo es de especial interés para el desarrollo de este trabajo, ya que, además de contar con múltiples zonas de cultivo de salmónidos, también es hogar del segundo arrecife de coral de agua fría más grande del mundo, transformándolo en un verdadero laboratorio natural (Fillinger & Richter, 2013). Lamentablemente, este fiordo es uno de los cuerpos de agua más susceptibles a experimentar procesos de eutrofización (ver Figura 4), es decir, a padecer un enriquecimiento excesivo de nutrientes inorgánicos, lo que aumenta en gran medida el riesgo de que se produzcan floraciones algales nocivas.

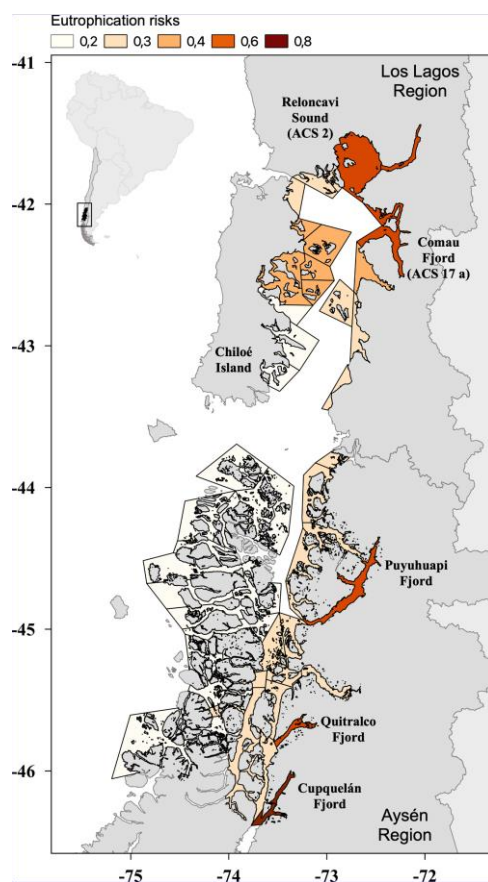


Figura 4. Riesgos comparativos de procesos de eutrofización (riesgo varía entre 0 y 1, donde 1 representa el riesgo máximo) en zonas de cultivo de salmón. (Fuente: (Soto et al., 2021)).

La sequedad hidrológica, así como un aumento de la radiación solar superficial, provoca la advección de aguas más salinas y ricas en nutrientes, lo que aumenta la probabilidad de afloramientos algales (León-Muñoz et al., 2018). Dado que se proyecta que las condiciones de sequía hidrológica en la zona norte de la Patagonia chilena continuarán a lo largo del siglo 21 (Aguayo et al., 2021), es importante que la industria acuícola se prepare para posibles eventos de FAN's a gran escala. Por esta razón, es imperante desarrollar sistemas de alerta temprana que permitan disminuir en la medida de lo posible los efectos negativos que conllevan estos eventos, siendo esta la razón principal que motiva el desarrollo de este trabajo.

1.2 Revisión bibliográfica o estado del arte

Una vez caracterizado el problema, se procede con el levantamiento del estado del arte concerniente a sistemas de monitoreo de FAN's. En Chile históricamente se han utilizado boyas oceanográficas y mediciones *in-situ* para el monitoreo de FAN's. Estas mediciones consisten en recopilar datos directamente en el entorno donde se desarrollan las floraciones. Dichas técnicas se consideran esenciales para comprender en detalle las floraciones algales nocivas, en el sentido de determinar su potencial toxicidad a modo de evaluar el riesgo para la salud pública y con ello tomar acciones mitigatorias (Guan et al., 2022). Sin embargo, como se expuso en la sección 1.1, producto del cambio climático se proyecta no solo un incremento en la cantidad de floraciones algales nocivas, sino que también un incremento en la intensidad y/o magnitud de dichos eventos (Tewari, 2022). Frente a este escenario, los métodos clásicos para el monitoreo de FAN's no dan abasto, siendo necesaria la implementación de nuevas metodologías que apoyen o reemplacen las anteriores. Dichas metodologías se conocen como sistemas de monitoreo de FAN's mediante percepción remota, los cuales emplean tecnologías capaces de obtener información del sitio de interés sin tener contacto físico directo con el mismo (Germán et al., 2020), como, por ejemplo, sensores instalados en satélites, RPAS, o aeronaves. Dichos sensores pueden medir variables de gran interés como la radiación electromagnética, temperatura, velocidad y dirección del viento, entre otros parámetros fisicoquímicos.

La pandemia del COVID-19 aceleró la migración hacia el uso de métodos de recolección de datos de manera remota (Wells et al., 2020), debido a una serie de ventajas que éstos presentan frente a los métodos tradicionales. Dichas ventajas se listan a continuación:

1. Mayor cobertura: Una ventaja evidente de utilizar percepción remota frente a la recolección *in-situ* es que permite abarcar áreas mucho más grandes, lo que es especialmente relevante dada la naturaleza del fenómeno de afloramiento algal, el cual se puede dar en volúmenes de agua extensos como fiordos o costas marinas.
2. Costo: Utilizar sistemas de monitoreo mediante percepción remota puede ser más económico a largo plazo que los sistemas de monitoreo tradicionales, debido a que el costo de mantenimiento de estos últimos es elevado al requerir una red extensa de estaciones de monitoreo, las que a su vez deben contar con personal y equipo adecuado para llevar a cabo los análisis.
3. Flujo de datos: Los sistemas de monitoreo mediante percepción remota pueden tener una frecuencia de muestreo superior a las mediciones *in-situ*, lo cual implica una alerta más temprana del fenómeno.
4. Reducción de riesgos para la salud: Dada la naturaleza de la obtención de datos mediante percepción remota, no es necesario enviar personal al volumen de agua de interés, reduciendo de esta manera su exposición a las toxinas que liberan las algas nocivas. Esta

ventaja es clave si se considera además el contexto de pandemia en el cual existían largos periodos de confinamiento.

- Integración de datos: La percepción remota no restringe la integración de datos con otras fuentes de información, como datos oceanográficos, meteorológicos o las mediciones *in-situ*. Lo anterior permite obtener un entendimiento más profundo del fenómeno.

Un ejemplo de la incorporación de sistemas de percepción remota para el monitoreo de FAN's que obtuvo excelentes resultados fue la utilización de los datos de irradiación y concentración de clorofila captados por los satélites Sentinel-2 y Sentinel-3 (Rodríguez-Benito et al., 2020). Estos satélites comparten órbita con un cambio de fase de aproximadamente 140° y cuentan con espectrómetros de imágenes de resolución media (300 metros), los cuales proveen 21 bandas y una frecuencia de revisita de 1 día para los sitios de interés estudiados, permitiendo monitorear la evolución espacio-temporal del fenómeno, como se puede ver en la Figura 5.

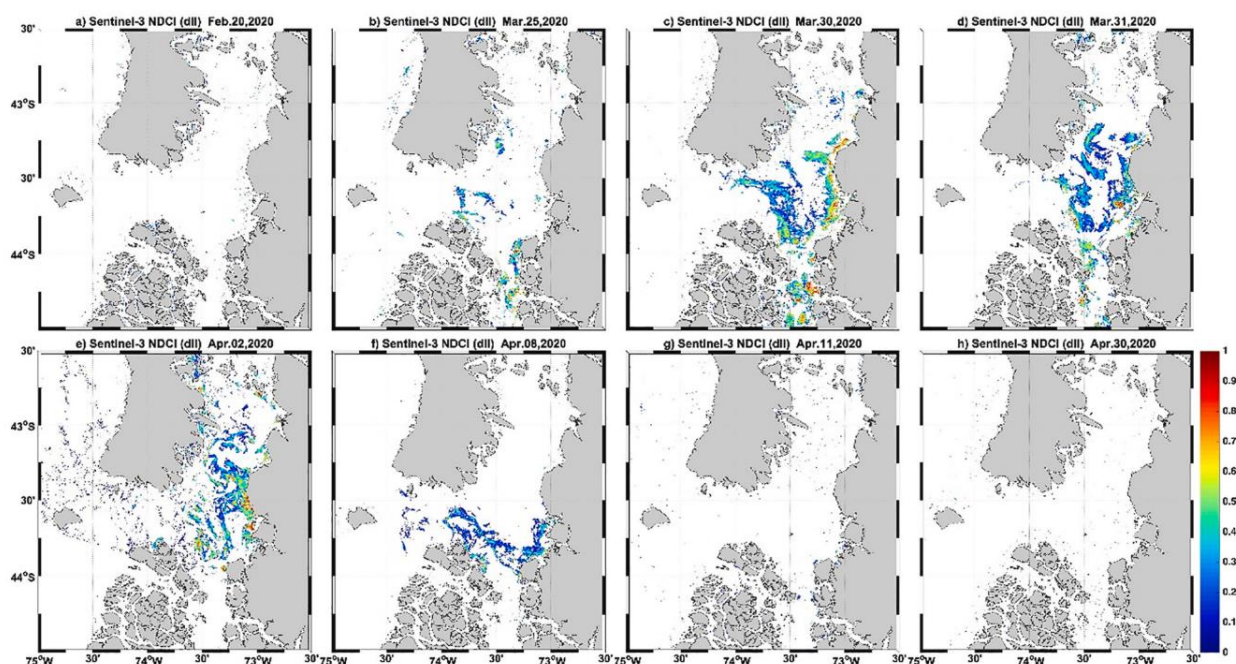


Figura 5. Evolución espacio-temporal de FAN utilizando satélites S2 y S3 durante Febrero-Abril 2020. (Fuente: (Rodríguez-Benito et al., 2020)).

Lamentablemente, este método no permite generar una alerta de posibles eventos futuros, ya que los satélites solo pueden captar datos en la zona fótica (área hasta donde alcanza a penetrar la luz del Sol), ignorando la posible presencia de quistes algales en zonas más profundas los cuales pueden generar nuevos eventos de FAN cuando son transportados verticalmente hasta la zona fótica producto de las corrientes oceánicas.

Dado el carácter global del fenómeno, también es posible encontrar sistemas de monitoreo de FAN's en otros lugares del mundo y con técnicas de recolección de datos diferentes a la percepción remota satelital, ejemplo de ello es el uso de *RPAS* en las costas de China (Cheng et al., 2020), en donde se registró de manera cualitativa la distribución de [Chl-a] en aguas costeras superficiales de baja altitud. Otro ejemplo es el uso de aeronaves equipadas con cámaras hiperespectrales en ríos urbanos de USA para obtener datos radiométricos que posteriormente son procesados para obtener la concentración de cianobacterias (Sawtell et al., 2019).

La ventaja de utilizar aeronaves por sobre satélites es que su uso es independiente del clima, dado que en días nublados los satélites pierden resolución y por tanto entregan información de baja calidad. Adicionalmente, las aeronaves pueden volar a alturas considerablemente mayores a los RPAS, pudiendo abarcar con mayor eficacia áreas grandes. Por su parte, los RPAS ofrecen un periodo de revisita de múltiples veces al día (Figura 6), cosa que no pueden ofrecer los satélites ni las aeronaves, por lo que en caso de requerir información inmediata son una alternativa ideal.

Platform	Spatial resolution (m)	Repeat cycle	Factors affecting image quality
Satellite	MODIS	250/500/1000	Atmospheric absorption, scattering and reflectance; cloud coverage; weather; terrain relief
	MERIS	300/1200	
	AVHRR	1100	
	Landsat TM	TM: 30/120; ETM+:15/30/60; OLI&TIRS:15/30/100	
	SPOT	SPOT 1-4:10/20; SPOT 5: 2.5/5/10/20; SPOT 6-7: 1.5/6	
UAV	< 0.5, can reach the level smaller than 0.1	Can be several times each day	Weather; terrain relief

Figura 6. Comparativa entre satélites y RPAS (UAV) en el monitoreo de floraciones algales nocivas. (Fuente: (Wu et al., 2019)).

Si bien estas ventajas son prometedoras, los instrumentos antes mencionados deben ser un complemento a los sistemas que utilizan percepción remota satelital como medio principal de recopilación de información, debido a que estos sistemas poseen efectividad comprobada en contextos regionales, como, por ejemplo, el uso de satélites COMS en mares de Korea (Noh et al., 2018). A pesar del éxito compartido por los sistemas de monitoreo de FAN's mediante percepción remota, se tiene que estos son incapaces de recolectar datos en regiones en que el agua alcanza mayores niveles de profundidad, limitando de esta manera su capacidad para evolucionar a sistemas de alerta temprana.

También es posible encontrar iniciativas recientes que utilizan las clásicas boyas oceanográficas en combinación con técnicas de *machine learning* para el monitoreo de FAN's (Wen et al., 2022), (Baek et al., 2021) que han dado buenos resultados a nivel local, sin embargo, son incapaces de ser replicados a gran escala debido a la necesidad de contar con una gran cantidad de boyas, así como servidores de almacenamiento exclusivos para el manejo y filtrado de datos, resultando en costos más elevados que simplemente dejar que ocurra el fenómeno sin intervención humana (Baek et al., 2021).

Basado en lo anterior, se puede concluir que, si bien existen múltiples arquitecturas para el monitoreo de FAN's, estas no poseen una capacidad de detección lo suficientemente robusta para generar alerta temprana, ya sea por la incapacidad de los sistemas de percepción remota para recolectar datos de zonas oceánicas profundas, las limitantes de los modelos actuales para propagar los datos en el tiempo, o bien por carencias en las interfaces de los subsistemas para poder actuar de manera unísona y con ello generar la propiedad emergente de alerta temprana. Para resolver las problemáticas identificadas, se propone utilizar el enfoque de *systems engineering* para el desarrollo de una arquitectura conceptual, entendiendo *systems engineering* como un enfoque transdisciplinario e integrador que permite la realización, uso y retiro exitoso de sistemas de ingeniería, mediante la utilización de principios y conceptos de sistemas en combinación con métodos científicos, tecnológicos y de gestión (SEBoK, 2022).

Independiente del tipo de sistema de recolección de datos utilizado por los diferentes sistemas de monitoreo de FAN's expuestos previamente, es posible identificar que las variables que buscan obtener son las mismas, debido a que la combinación de estas permite caracterizar el fenómeno. Dado que la arquitectura conceptual por desarrollar utilizará fiordo Comau como volumen de agua a analizar, es de especial interés conocer las especies nocivas que habitan ahí, y los rangos de magnitud de las variables críticas que propician el crecimiento sin control de dichas especies, esta información se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de variables críticas que caracterizan un fenómeno de floración algal de especies nocivas. Recuperado de (Mardones et al., 2014, 2023; Sandoval et al., 2018)

Variable	Unidad de medida	<i>Pseudo-nitzschia</i>	<i>Alexandrium catenella</i>	<i>Heterosigma akashiwo</i>
Temperatura	[°C]	2 – 28	5 – 17	14 – 18
Salinidad	[°/oo]	30 – 36	15 – 32	15 – 32
Velocidad de corriente	[cm/s]	< 5	< 5	< 5
Irradiación	[$\mu E/m^2 s$]	20	20	20
pH	[–]	~ 8.1	8.7 – 9.8	~ 7.4

Es posible verificar que las variables que caracterizan los afloramientos algales son de origen biogeoquímico, hidrodinámico o atmosférico. Por lo que al momento de desarrollar la arquitectura se considerarán estas tres grandes categorías.

Cabe destacar que, a modo de complementar la información presentada, se realizó de manera adicional a la revisión bibliográfica una serie de entrevistas a investigadores con experiencia en el estudio de las floraciones algales nocivas en Chile, a modo de incorporar el juicio de expertos. En particular, se entrevistó al director del Centro de Investigación Acuícola de la Universidad de Concepción (INCAR), Dr. Renato Quiñones, en conjunto con el Dr. Rodrigo Montes y la Dra. Valeria Anabalón, pertenecientes al mismo centro. También se entrevistó al Dr. Samuel Hormazábal, director científico de la Fundación San Ignacio del Huinay; y al Dr. Osvaldo Artal, investigador asociado del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).

1.3 Solución propuesta

Si bien existen múltiples arquitecturas que emplean percepción remota para el monitoreo de FAN's, estas cuentan con una capacidad limitada para propagar los datos en el tiempo, por lo que no se pueden considerar sistemas de alerta temprana dada su inhabilidad para dicha alerta. Por ello, se propone desarrollar una arquitectura conceptual que sirva como marco de referencia para quien desee desarrollar un sistema de alerta temprana, en donde se pueda integrar los sistemas de monitoreo de FAN's a otros sistemas para así generar la propiedad emergente deseada.

Para conseguir lo anterior, se utilizará una metodología diferente a lo tradicional en lo que concierne al desarrollo de arquitecturas de sistemas, ya que se emplearán modelos como herramienta principal para establecer los diferentes subsistemas, interfaces e interacciones entre componentes y entidades.

1.4 Hipótesis y objetivos

1.4.1 Hipótesis

Mediante la utilización del enfoque de ingeniería de sistemas basada en modelos, es posible desarrollar una arquitectura conceptual de un sistema que estime el riesgo de que se produzca una floración algal nociva en el fiordo Comau, y que a su vez entregue una alerta con antelación suficiente para que el usuario de dicho sistema pueda actuar de manera apropiada.

1.4.2 Objetivos

1.4.2.1 Objetivo general

OG: Desarrollar una arquitectura conceptual de un sistema que estime el riesgo de floraciones algales en el fiordo Comau, y que a su vez entregue una alerta con antelación suficiente para que el usuario de dicho sistema pueda actuar de manera apropiada empleando ARCADIA como metodología.

1.4.2.2 Objetivos específicos

OE1: Identificar las necesidades de los futuros usuarios del sistema a modo de garantizar una definición adecuada del sistema en relación con su uso operativo real.

OE2: Definir funciones de alto nivel capaces de satisfacer las necesidades previamente establecidas de tal manera que estas funciones no limiten posibles dominios solución.

OE3: Describir el comportamiento emergente a nivel de sistema a partir de la integración de las funciones previamente establecidas.

1.5 Metodología

(OE1, OE2 y OE3) La metodología que se utilizará en este trabajo se conoce como ARCADIA. Esta metodología impone un enfoque estructurado en fases sucesivas de ingeniería (Figura 7) que establece una clara separación entre las necesidades o requisitos (realizando la distinción entre requisitos operativos y requisitos del sistema) y las soluciones, las cuales corresponden a arquitecturas lógicas o físicas. El detalle de las cuatro etapas del método ARCADIA se presenta a continuación:

1. **Análisis de requisitos operativos del cliente:** Esta primera etapa está enfocada en analizar las necesidades y objetivos del cliente, las misiones y actividades esperadas, sin entrar en detalle de los requisitos del sistema. El objetivo es garantizar una definición adecuada del sistema con respecto a su uso operativo real. Se espera contar con una “arquitectura operativa”, que describa y organice las necesidades en términos de usuarios/actores, y sus capacidades y actividades operacionales.
2. **Análisis de las necesidades del sistema:** La segunda etapa está enfocada en el sistema mismo, de tal manera que éste pueda satisfacer la necesidad operativa planteada en la etapa previa. Los elementos a crear en esta etapa son: funciones (o servicios), restricciones no funcionales, y establecimiento de las interfaces del sistema. El objetivo es comprobar la viabilidad de los requisitos del cliente y, si es necesario, renegociar su

contenido. Se espera contar con las descripciones de las necesidades funcionales del sistema (funciones y cadenas funcionales), la interoperabilidad y la interacción con los usuarios.

3. **Arquitectura lógica:** Partiendo del análisis previo, se realiza una primera definición del comportamiento esperado de la solución mediante funciones, interfaces, flujos de datos, etc.). Para integrar estas funciones, hay que construir una o más descomposiciones del sistema en componentes lógicos, asignando cada función a un componente. Estos componentes lógicos tenderán a ser posteriormente la descomposición básica para la definición de los elementos de desarrollo, integración, reutilización, producto y gestión de la configuración. Se espera obtener la arquitectura lógica descrita a través de una descripción funcional, la definición de componentes e interfaces justificadas, junto con la formalización de los puntos de vista de los *stakeholders* y la forma en la que se tienen en cuenta en el diseño de los componentes.
4. **Arquitectura física:** La última etapa tiene el mismo propósito que la etapa previa, con la excepción de que define la arquitectura final. Una vez terminado el modelo se considera listo para su desarrollo, de esta manera, se introducen más detalles y decisiones de diseño racionalización, patrones arquitectónicos, nuevos servicios técnicos y componentes de comportamiento, y hace que la visión de la arquitectura lógica evolucione de acuerdo con la implementación, las restricciones y las elecciones técnicas y tecnológicas. Se espera obtener la arquitectura física seleccionada que incluye los componentes que se van a producir, la formalización de todos los puntos de vista de los *stakeholders* y la forma en la que se tienen en cuenta en el diseño de los componentes. También se establecen vínculos con los requisitos y los escenarios operativos.

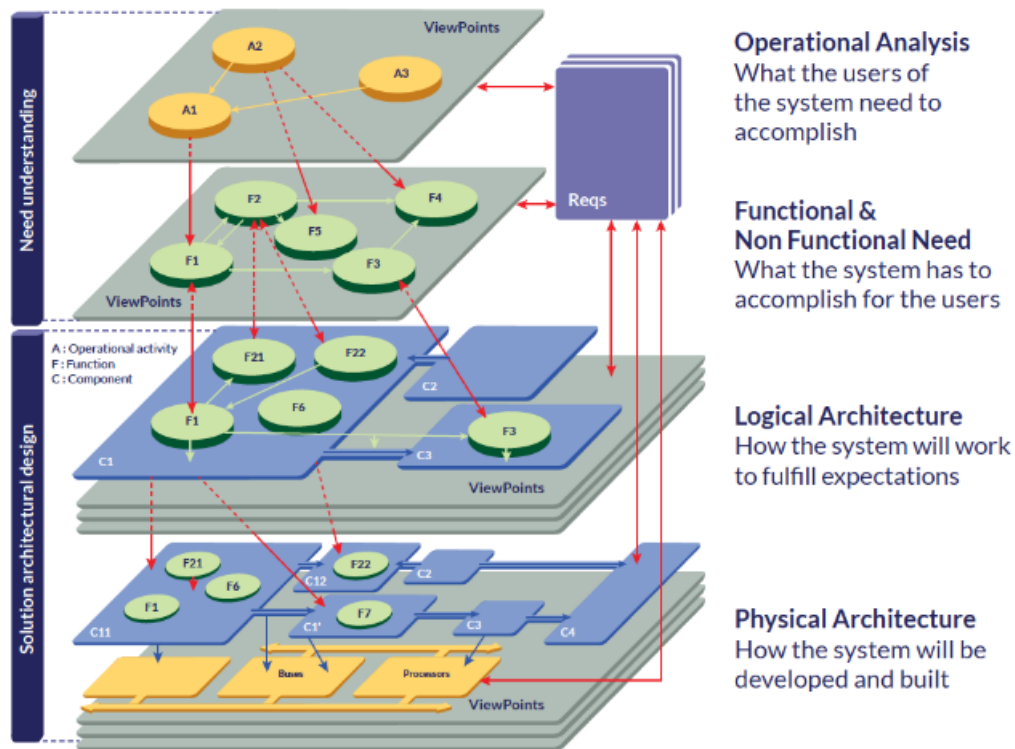


Figura 7. Método Arcadia para diseño de arquitecturas de sistemas, hardware y software. (Fuente: (Eclipse, 2022a)).

Cabe destacar que en este trabajo solo se llevarán a cabo las tres primeras etapas de la metodología ARCADIA, pues la arquitectura lógica (resultado final de la tercera etapa) es justamente la arquitectura conceptual (Voirin, 2018b).

Respecto a los alcances de la metodología, se tiene que esta permite establecer en detalle todas las funciones, interfaces, escenarios y modos de operación del sistema a diseñar de una manera estandarizada y por tanto fácil de seguir. Adicionalmente, se destaca que ARCADIA se aplica actualmente en diversos ámbitos y organizaciones, por lo que se encuentra probado en situaciones industriales reales. La Figura 8 presenta un resumen de las ventajas que conlleva el diseño de una arquitectura conceptual en proyectos complejos de ingeniería.

Respecto a las limitaciones de la metodología, se resalta la obligación de realizar múltiples iteraciones para llegar a un resultado capaz de satisfacer las necesidades planteadas por las partes interesadas en el sistema, por lo que puede no ser la mejor opción en proyectos que requieran un diseño de sistema en periodos de tiempo acotados. Adicionalmente, para obtener resultados de calidad a través de esta metodología, es imperante que el ingeniero de sistemas sea capaz de ver el panorama global (Ryschkewitsch et al., 2009), a modo de no limitar los posibles dominio solución de la arquitectura. Finalmente, se destaca que la curva de aprendizaje de la herramienta que contiene la metodología (Capella Tool) es bastante pronunciada debido a que es poco intuitiva para un nuevo usuario.

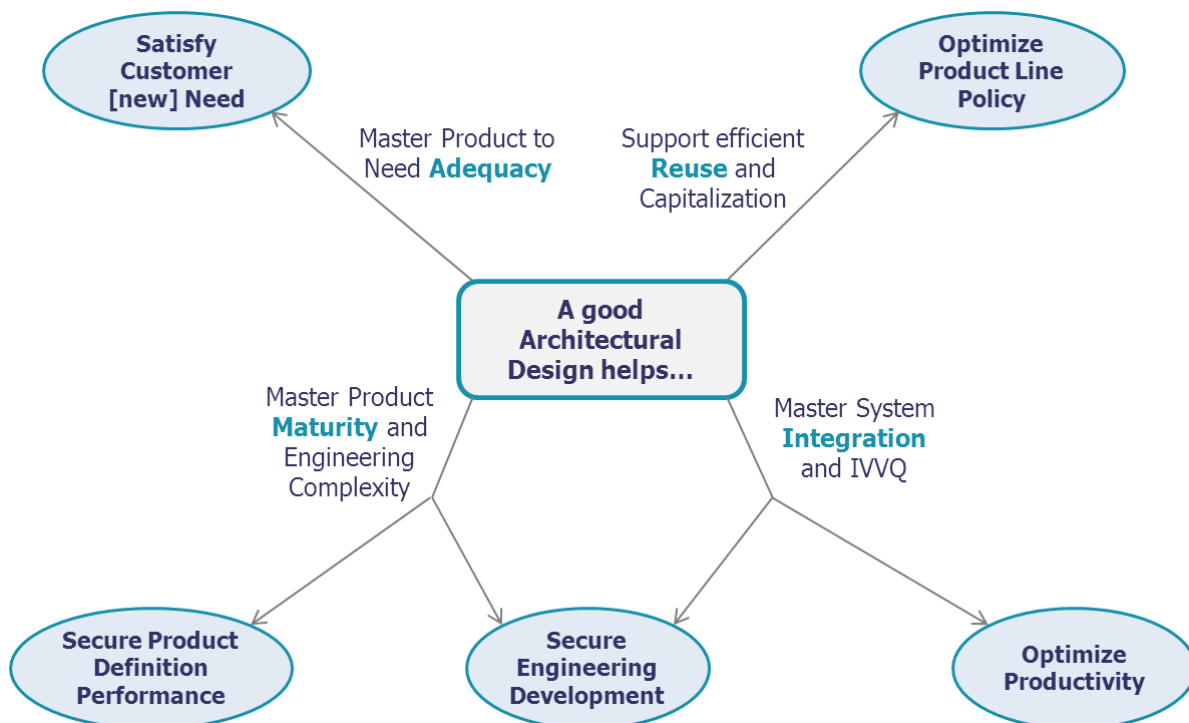


Figura 8. Diseño de arquitectura como motor principal de la ingeniería. (Fuente: (Voirin, 2023))

CAPÍTULO 2

En este capítulo se definirán una serie de conceptos relacionados a la disciplina de ingeniería de sistemas basada en modelos. Adicionalmente, se expondrán los principales diagramas de la metodología ARCADIA a modo de facilitar la comprensión del contenido futuro del trabajo.

2 BASES DE LA INGENIERÍA SISTÉMICA

2.1 *Systems Engineering*

Los ingenieros diseñan y producen sistemas técnicos para satisfacer necesidades específicas (Knoll, 2019). Los sistemas constan de una serie de elementos interrelacionados cuyo objetivo es servir un propósito (Crawley et al., 2015). Dichos elementos pueden ser considerados sistemas por sí mismos e incluso el sistema global puede ser parte de una entidad superior. Es relevante mencionar que en el desarrollo de sistemas (como en el caso de este trabajo), las palabras sistema o producto se utilizan de manera intercambiable y hacen referencia a lo que se desea obtener.

El consejo internacional de ingeniería de sistemas (INCOSE), define *systems engineering* como un “enfoque multidisciplinario y los medios para permitir la realización de sistemas exitosos. Se centra en definir las necesidades del cliente, así como la funcionalidad requerida al principio del ciclo de desarrollo, mediante la documentación de requisitos para luego proceder con la síntesis del diseño y la validación del sistema considerando el problema completo: operaciones, costo y cronograma, rendimiento, entrenamiento y soporte, ensayos, manufactura y eliminación. *Systems engineering* considera tanto el aspecto de negocio como las necesidades técnicas de todos los clientes con el objetivo de proveer un producto de calidad capaz de satisfacer todas las necesidades de los usuarios del sistema” (SEBoK, 2022).

El ciclo de vida es utilizado en *systems engineering* para describir el proceso de la evolución de un sistema a través de diferentes fases o etapas, abarcando no sólo las fases de desarrollo, producción o utilización, sino también la fase de retirada, cuando se produce el desmantelamiento y eliminación del sistema (Shashank, 2019). El objetivo principal de la ingeniería de sistemas es gestionar el sistema en todas las fases de su ciclo de vida.

Los modelos de ciclo de vida varían de una industria a otra, por ejemplo, dos actores relevantes en lo que respecta a *systems engineering* como lo son NASA y DoD han desarrollado varios modelos de ciclo de vida, que pueden difereir en cuanto a los procesos y métodos que intervienen en las distintas etapas del ciclo de vida. Independientemente de cómo se subdividan las etapas del ciclo de vida, (Forsberg et al., 2005) propone un modelo de ciclo de vida de proyecto de referencia en el cual se pueden identificar tres periodos principales: el periodo de estudio, el periodo de implementación y el periodo de operación. Estos periodos corresponden a los objetivos principales del sistema solución a medida que madura desde la identificación de las necesidades de los usuarios o *stakeholders* (cualquier entidad interesada en el sistema (SEBoK, 2022)), pasando por la determinación conceptual del sistema, su implementación, y finalmente su producción, operación y retiro. En la Figura 9 se pueden apreciar distintos modelos de ciclo de vida de proyecto y como las etapas de dichos modelos se pueden incluir dentro de uno de los periodos principales propuestos por (Forsberg et al., 2005).

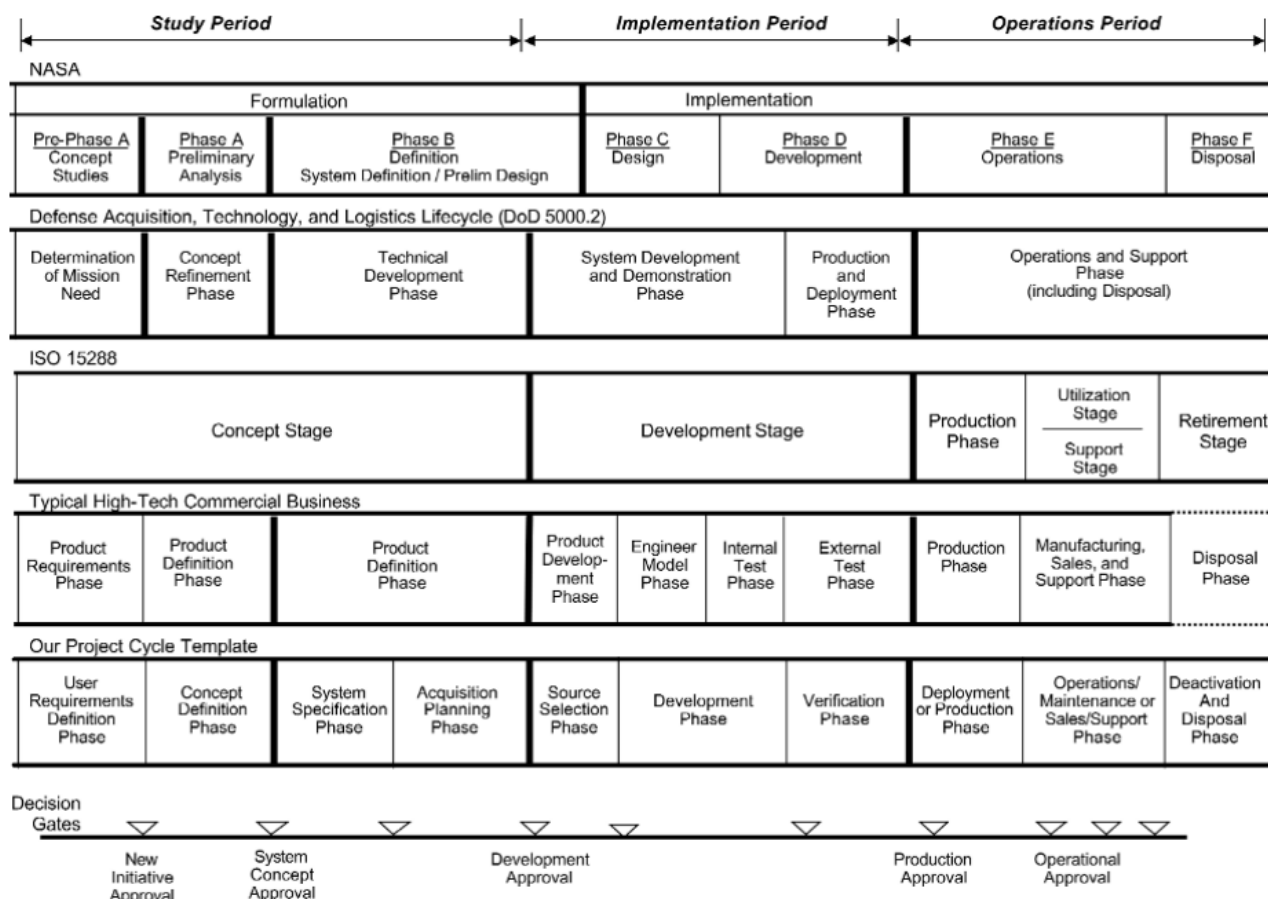


Figura 9. Modelos de ciclo de vida de proyecto. (Fuente: (Forsberg et al., 2005)).

La importancia de utilizar *systems engineering* se puede ver ilustrada en la Figura 10, la cual muestra que los costos del ciclo de vida de un programa o proyecto tienden a “fijarse” en las etapas iniciales de diseño. Las curvas de costo muestran que una identificación tardía de problemas en el diseño provoca costos adicionales notables a medida que se avanza en el ciclo de vida. Los triángulos celestes indican hitos a lo largo del ciclo de vida de proyecto.

De esta manera, los costos son determinados por los conceptos y diseños iniciales, ejemplo de esto es que, durante la etapa de diseño, alrededor de un 15% de los costos de proyecto se han gastado, pero el diseño mismo habrá comprometido un 75% de los costos totales del proyecto (Cloutier & Hutchinson, 2021). Lo anterior se debe a que la forma en la que se diseñe el sistema determinará lo costoso que será ensayarlo, fabricarlo, integrarlo, operarlo y mantenerlo. Si estos factores no se han tenido en cuenta durante la etapa de diseño suponen un riesgo de costo importante en el ciclo de vida. En base a lo anterior, y considerando el contexto de este trabajo, es evidente el valor añadido que tiene el desarrollo de una arquitectura conceptual para un sistema de alerta temprana de floraciones algales nocivas al entregar un marco de referencia sólido para quien desee continuar con etapas más avanzadas del ciclo de vida de proyecto.

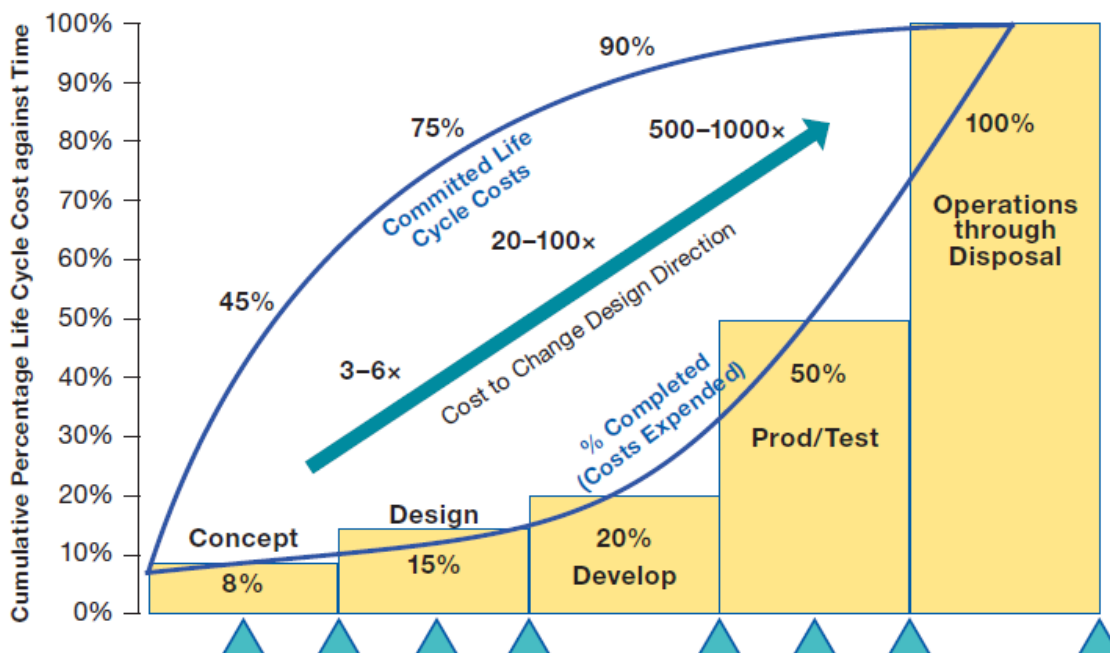


Figura 10. Impacto en los costos del ciclo de vida producto de cambios respecto al diseño inicial. (Fuente: (NASA, 2016)).

El desarrollo de un sistema (definir requisitos, transformar requisitos en producto, usar el producto para proveer los servicios requeridos, para sostener dicha provisión de servicios y para disponer el producto cuando es retirado de servicio) se alcanza a través de una serie de procesos técnicos, donde cada uno puede aparecer en uno o más etapas del ciclo de vida del proyecto (Knoll, 2019). El resultado documentado de dichos procesos de *systems engineering* son artefactos intermedios. En la próxima sección se describirá la transición de utilizar documentos textuales a modelos, rama conocida como *model-based systems engineering*.

2.2 Model-based systems engineering

Model-based systems engineering (MBSE), es una tendencia reciente específica dentro de *systems engineering* que defiende el uso de un modelo central como medio de coordinación para un diseño de sistema (Cameron & Adsit, 2020). Como definición formal, se tiene que MBSE es “un enfoque que utiliza modelos como una parte integral de la línea base técnica que incluye los requisitos, análisis, diseño, implementación y verificación de una capacidad, sistema y/o producto a lo largo del ciclo de vida del proyecto” (NDIA Systems Engineering Division, 2011).

En base a la definición anterior, queda en evidencia que los modelos, entendidos como “una representación física, matemática o lógica de un sistema, entidad, fenómeno o proceso” (Friedenthal, 2022), o “un mecanismo para simplificar información compleja para un propósito específico” (Cameron & Adsit, 2020), son los artefactos principales de MBSE. Esto contrasta con el enfoque tradicional de *systems engineering* centrada en documentos, en la que se gestiona y controla la documentación y especificaciones basadas en texto. La principal ventaja de migrar hacia una descripción de sistema basada en modelos responde a la automatización, ya que permite una comprobación automática de la coherencia a través de todos los subsistemas que formen parte del producto (consistencia). En la Figura 11 se enlistan las ventajas principales de utilizar MBSE.

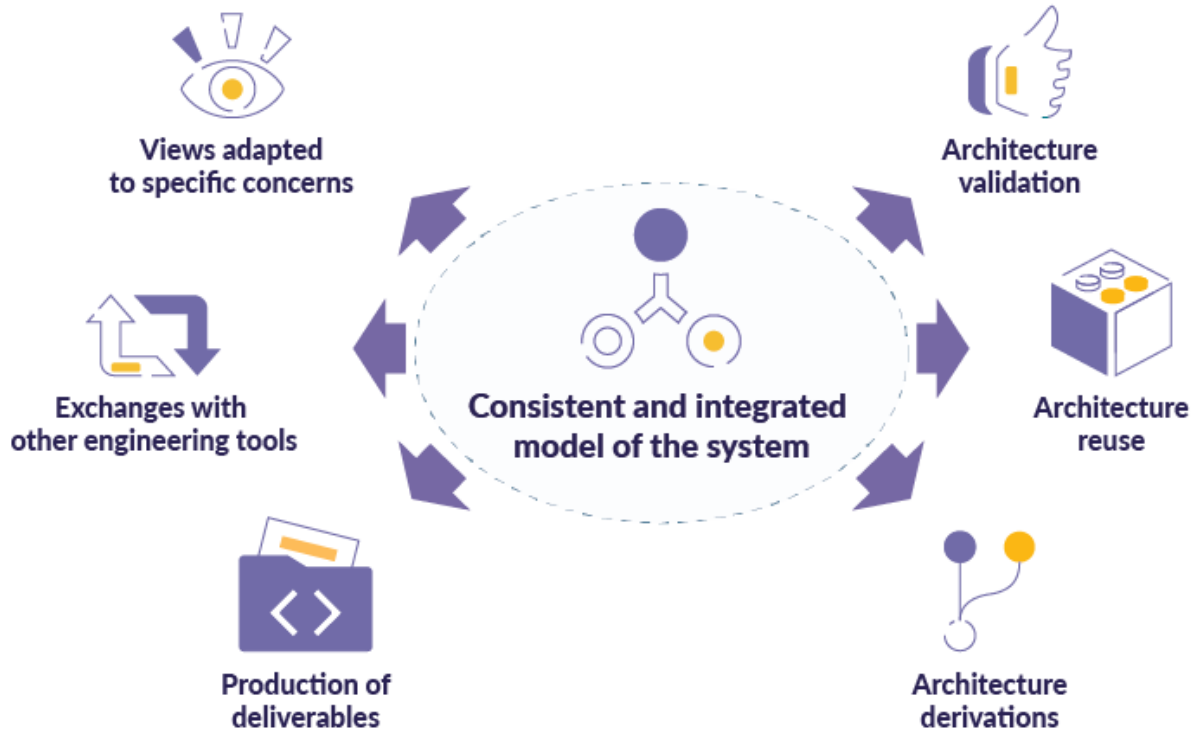


Figura 11. Ventajas de utilizar MBSE. (Fuente: *Capella MBSE Tool - What Is MBSE*, 2022).

Los modelos son utilizados comúnmente para describir ciertos aspectos del sistema y su entorno. Todo modelo tiene un ámbito de aplicación definido explícita o implícitamente. En función del alcance y la precisión requerida de la representación, se utilizan diferentes tipos de modelos, de los cuales se destacan los modelos descriptivos y analíticos.

El objetivo principal de los modelos descriptivos es la comunicación y documentación. Por el contrario, los modelos analíticos son utilizados para obtener conocimiento respecto al fenómeno modelado. Dentro de los modelos analíticos se encuentran los modelos paramétricos los cuales se utilizan de manera regular en el diseño conceptual de sistemas para estimar los valores de las características claves del sistema (Knoll, 2019).

Cabe destacar que MBSE necesita tres “pilares” fundamentales para su correcta aplicación. Estos son: un lenguaje de modelado, un método de modelado, y una herramienta de modelado (Delligatti, 2014).

- El lenguaje de modelado define los tipos de elementos que se pueden incluir en el modelo, las relaciones permitidas entre ellos y el conjunto de notaciones que se pueden utilizar para mostrar los elementos y las relaciones en los diagramas.
- El método de modelado describe qué actividades de diseño hay que realizar, qué artefactos de ingeniería se deben producir y la forma en la que estos se denotan. Si bien existen múltiples métodos de modelado, es común identificar cuatro etapas o fases: identificación de necesidades, derivación de las funcionalidades requeridas del sistema, identificación de estados y modos del sistema, asignación de funcionalidades del sistema a una arquitectura física.

- Finalmente, las herramientas de modelado son una clase especial de herramientas que están diseñadas e implementadas para cumplir con las reglas de uno o más lenguajes de modelado, lo que le permite construir modelos bien formados en esos lenguajes (Delligatti, 2014).

En base a las descripciones anteriores, es posible identificar que ARCADIA provee tanto un lenguaje de modelado como un método de modelado, por lo que es necesario contar con una herramienta adaptada a estos pilares. En efecto, Capella es una herramienta de modelado *Open Source* pensada para ser trabajada en conjunto con ARCADIA. En la Figura 12 es posible apreciar la interacción entre ARCADIA/Capella y los tres pilares de MBSE.

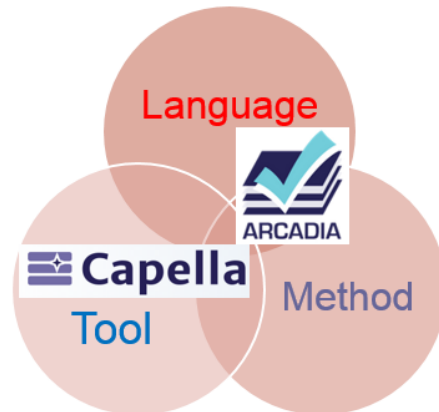


Figura 12. Pilares de MBSE con ARCADIA/Capella. (Fuente: (Roques, 2017)).

La metodología ARCADIA es considerada como un enfoque “*top-down*” para el diseño y análisis de sistemas complejos, pues se basa en la descomposición del sistema global en componentes pequeños para hacerlos más manejables. Esta característica ofrece una forma estructurada de gestionar la complejidad, facilita la colaboración en equipo y garantiza el cumplimiento de los objetivos generales del sistema. La Figura 13 esquematiza lo anteriormente mencionado.

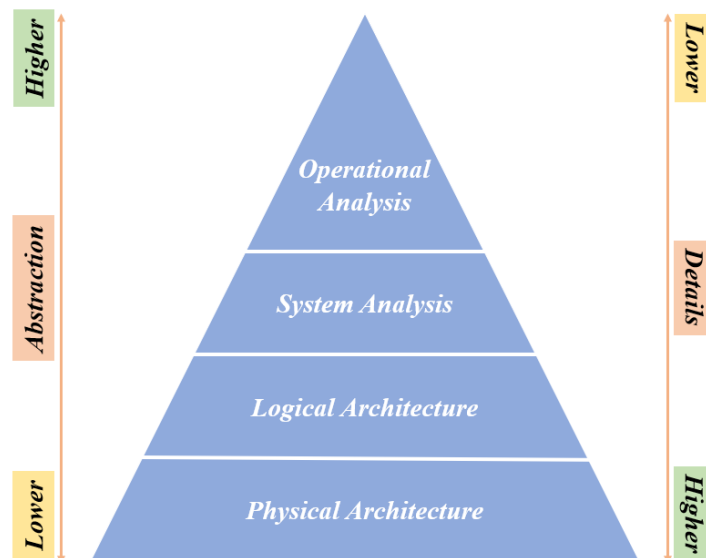


Figura 13. Enfoque descendente para el diseño de sistemas en ARCADIA. Elaboración propia.

2.3 Principales tipos de diagramas en Arcadia

2.3.1 Diagramas de flujo de datos

Los diagramas de flujos de datos (Figura 14) están disponibles en todos los niveles de Arcadia. Representan la red de dependencia de información entre las funciones (*functional exchange*). Estos diagramas proveen un diverso conjunto de mecanismos para gestionar la complejidad: enlaces simplificados calculados entre las funciones de alto nivel, la categorización de los intercambios funcionales, etc. Las cadenas funcionales (*functional chains*), son agrupaciones de funciones cuyo objetivo es responder a una capacidad del sistema y pueden ser representadas como caminos de color.

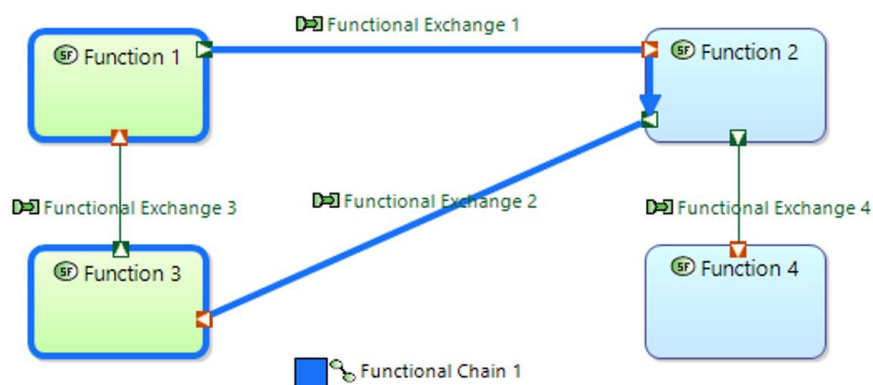


Figura 14. Diagrama de flujo de datos. (Fuente: (Roques, 2017)).

2.3.2 Diagramas de arquitectura

Los diagramas de arquitectura están disponibles en todos los niveles de ARCADIA. Su objetivo principal es mostrar la asignación de funciones a componentes. Al igual que en los diagramas de flujo, las cadenas funcionales se representan como caminos resaltados.

En el análisis del sistema (Figura 15), estos diagramas contienen una caja que representa el sistema bajo estudio y los actores (*system actors*) que lo rodean.

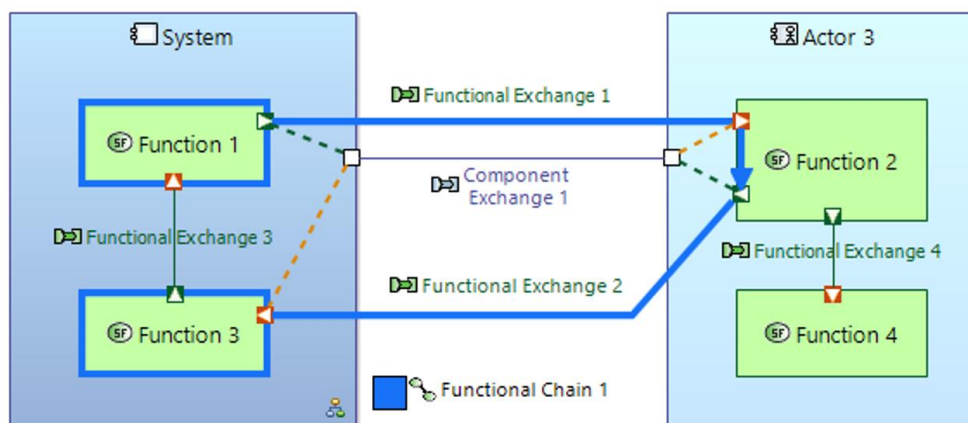


Figura 15. Diagrama de arquitectura en análisis de sistema. (Fuente: (Roques, 2017)).

En la arquitectura lógica (Figura 16), estos diagramas muestran los elementos constitutivos del sistema. Estos son llamados componentes lógicos (*logical components*).

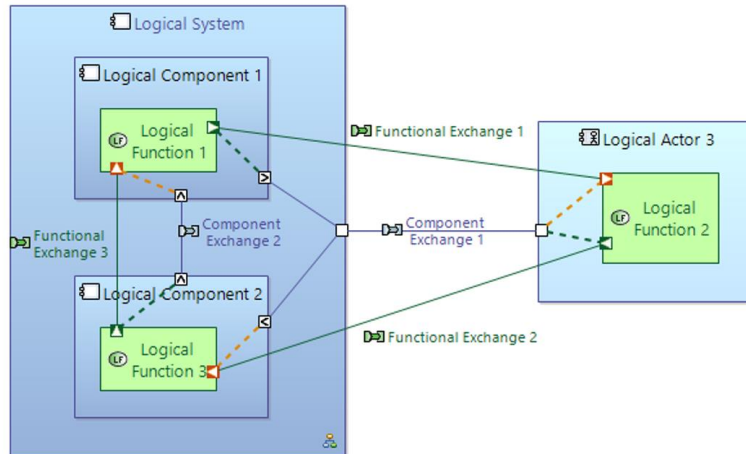


Figura 16. Diagrama de arquitectura en arquitectura lógica. (Fuente: (Roques, 2017)).

2.3.3 Diagramas de descomposición

Los diagramas de descomposición (Figura 17), representan de manera jerárquica las funciones o componentes en todos los niveles del diseño ingenieril.

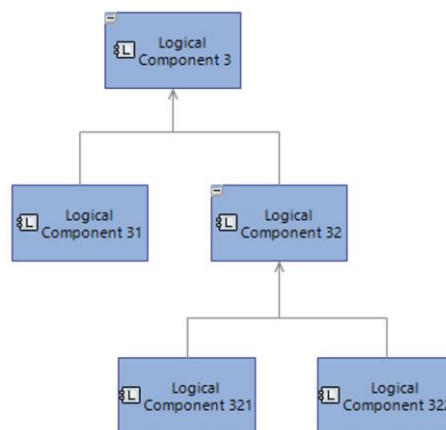


Figura 17. Diagrama de descomposición. (Fuente: (Roques, 2017)).

2.3.4 Diagramas de capacidades

Los diagramas de capacidades (Figura 18) se encuentran disponibles para todos los niveles de Arcadia, pero son especialmente útiles en el análisis operativo y el análisis del sistema. Estos diagramas permiten resaltar las relaciones entre misiones, capacidades y actores.

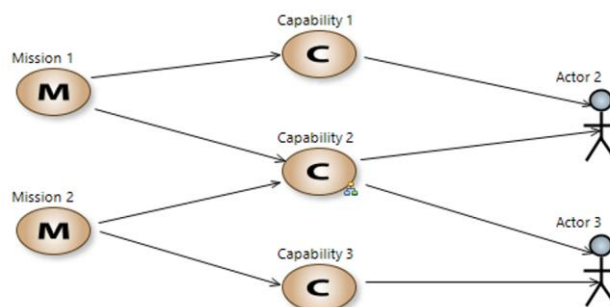


Figura 18. Diagrama de capacidades. (Fuente: (Roques, 2017)).

CAPÍTULO 3

En este capítulo se detalla la primera fase de la metodología ARCADIA y su implementación en Capella para el desarrollo de la arquitectura conceptual.

3 ANÁLISIS OPERATIVO







3.1 Definiciones previas y objetivos del análisis operativo

El análisis operativo (OA) busca captar y consolidar las necesidades operativas de los *stakeholders*, esto es, definir lo que tienen que hacer los usuarios del sistema mediante la identificación de todos los actores, que interactúan con el sistema, sus objetivos, actividades, restricciones y las interacciones entre estas condiciones (Eclipse, 2022).

El objetivo del análisis operativo es entender las necesidades de los clientes sin realizar ningún supuesto previo acerca de cómo el sistema debe funcionar, de esta manera se evita desechar alternativas interesantes que puedan satisfacer las necesidades de los *stakeholders*. Dentro del análisis operativo se utiliza una nomenclatura específica la cual se expone en la Tabla 2.

Es altamente recomendado visitar el análisis operativo en función de la evolución tecnológica del mercado, ya que esto puede permitir proponer nuevos productos, soluciones o características, generando así una propuesta más sólida para los *stakeholders*.

Tabla 2. Conceptos del análisis operativo. (Fuente: (Cerqueira, 2022))

Representación en Capella	Concepto
 Capacidad operativa	Capacidad de una organización de proveer un servicio de alto nivel que lleva a al cumplimiento de la misión.
 Entidad operativa	Entidad física (organización u sistema existente), cuyo rol es interactuar con el sistema estudiado o con sus usuarios.
 Actor operativo	Caso particular de una entidad operativa no descomponible (persona).
 Actividad operativa	Proceso paso a paso llevado a cabo para alcanzar un objetivo particular para una entidad operativa.
 Interacción operativa	Traspaso o intercambio de información entre actividades operativas.
 Proceso operativo	Serie de actividades e interacciones operativas que contribuyen hacia una capacidad operativa.

3.2 Desarrollo del análisis operativo en Capella

3.2.1 Definición de entidades y capacidades operativas

El análisis operativo pretende formar una noción inicial de lo que el usuario del sistema necesita conseguir. En este sentido, el análisis operativo suele empezar por identificar quiénes son los usuarios y/o entidades que interactuarán con el futuro sistema, así como las posibles relaciones que se formarán entre dichos usuarios (Castro, 2023a). De esta manera, se identificaron cuatro identidades operativas, que se relacionarán estrechamente con el futuro sistema de alerta temprana de floraciones algales nocivas:

- **Fiordo Comau:** Naturalmente, un actor que siempre va a estar implicado con el futuro sistema va a ser el sitio de interés en el cual se desee llevar a cabo el monitoreo y estimación de riesgo de afloramientos algales. En el caso del presente trabajo dicho sitio corresponde al fiordo Comau.
- **Operador (del futuro sistema):** Otro actor que estará estrechamente relacionado con el sistema corresponderá al/los operador/es de dicho sistema. Dicho operador deberá contar con conocimientos técnicos relacionados a modelos predictivos de floraciones algales nocivas, así como gestión de sistemas complejos.
- **Sensores:** La presencia de múltiples sensores que apoyen al sistema será fundamental para llevar a cabo las tareas de monitoreo y recolección de datos de manera pasiva, es decir, detectar y registrar señales o información emitidas de forma natural por el entorno.
- **Industrias acuícolas:** Finalmente, los usuarios finales del sistema corresponderán a las empresas interesadas en contar con la alerta temprana de posibles eventos de afloramiento algal, a modo de prepararse para dichos eventos y con ello disminuir de manera significativa sus pérdidas.

En base al levantamiento del estado del arte realizado en el capítulo 1.2, en conjunto a las diversas entrevistas realizadas a expertos en el área de floraciones algales nocivas en la Patagonia chilena, se definieron seis capacidades operativas, entendidas como servicios de alto nivel que deben aportar las entidades operativas previamente definidas:

- Predicción de eventos de afloramiento algal.
- Estimación de riesgo basado en las condiciones hidrodinámicas y atmosféricas del sitio de interés.
- Identificación de floraciones algales nocivas no-catalogadas.
- Seguimiento de floraciones algales nocivas catalogadas.
- Interacción con otros sistemas de alerta temprana.
- Prestación del servicio de manera ininterrumpida.

La Figura 19 muestra la relación entre las cuatro entidades operativas y las seis capacidades operativas en un diagrama conocido como *Operational Capabilities Diagram*.

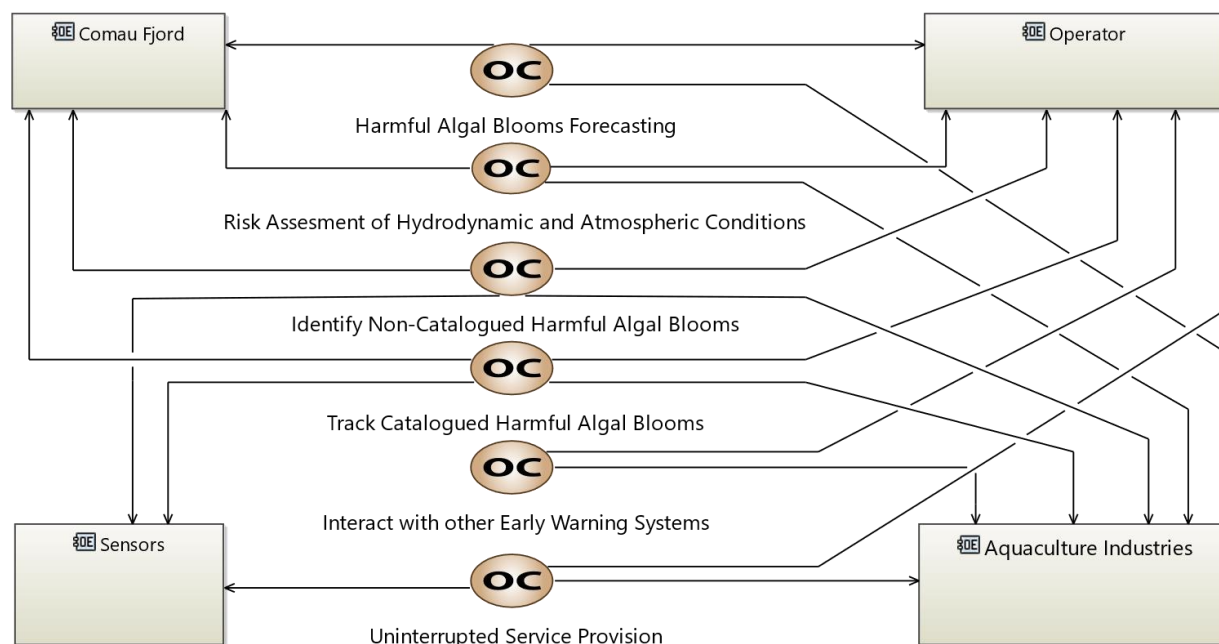


Figura 19. *Operational Capabilities Diagram*. Elaboración propia.

Es importante notar que, si bien las cuatro entidades operativas definidas estarán estrechamente relacionadas con el sistema, no formarán parte de este. Esta es una decisión tomada con el objetivo de dar la mayor flexibilidad en la elección de sensores y/o operadores de sistema a quienes utilicen la arquitectura conceptual como referencia para el diseño de su propio sistema.

3.2.2 Definición de arquitectura operativa

Continuando el análisis operativo, se establecen las actividades operativas que cada entidad operativa debe realizar a modo de satisfacer las capacidades operativas previamente definidas. Dichas actividades operativas se comunican entre ellas mediante interacciones operativas, las cuales corresponden a intercambios unidireccionales de información. Es posible agrupar las actividades operativas mediante cadenas conocidas como procesos operativos, en donde cada proceso operativo responde a una capacidad operativa particular, por lo que puede abarcar actividades realizadas por múltiples entidades operativas.

La Figura 20, conocida como arquitectura operativa, es el resultado final del análisis operativo, y en ella se pueden identificar las actividades operativas (recuadros de color naranja) que debe realizar cada una de las entidades, las interacciones operativas y los seis procesos operativos (cadenas de colores) que buscan satisfacer las capacidades operativas. Notar que las actividades operativas que poseen un borde exterior negro pertenecen a dos o más procesos operativos.

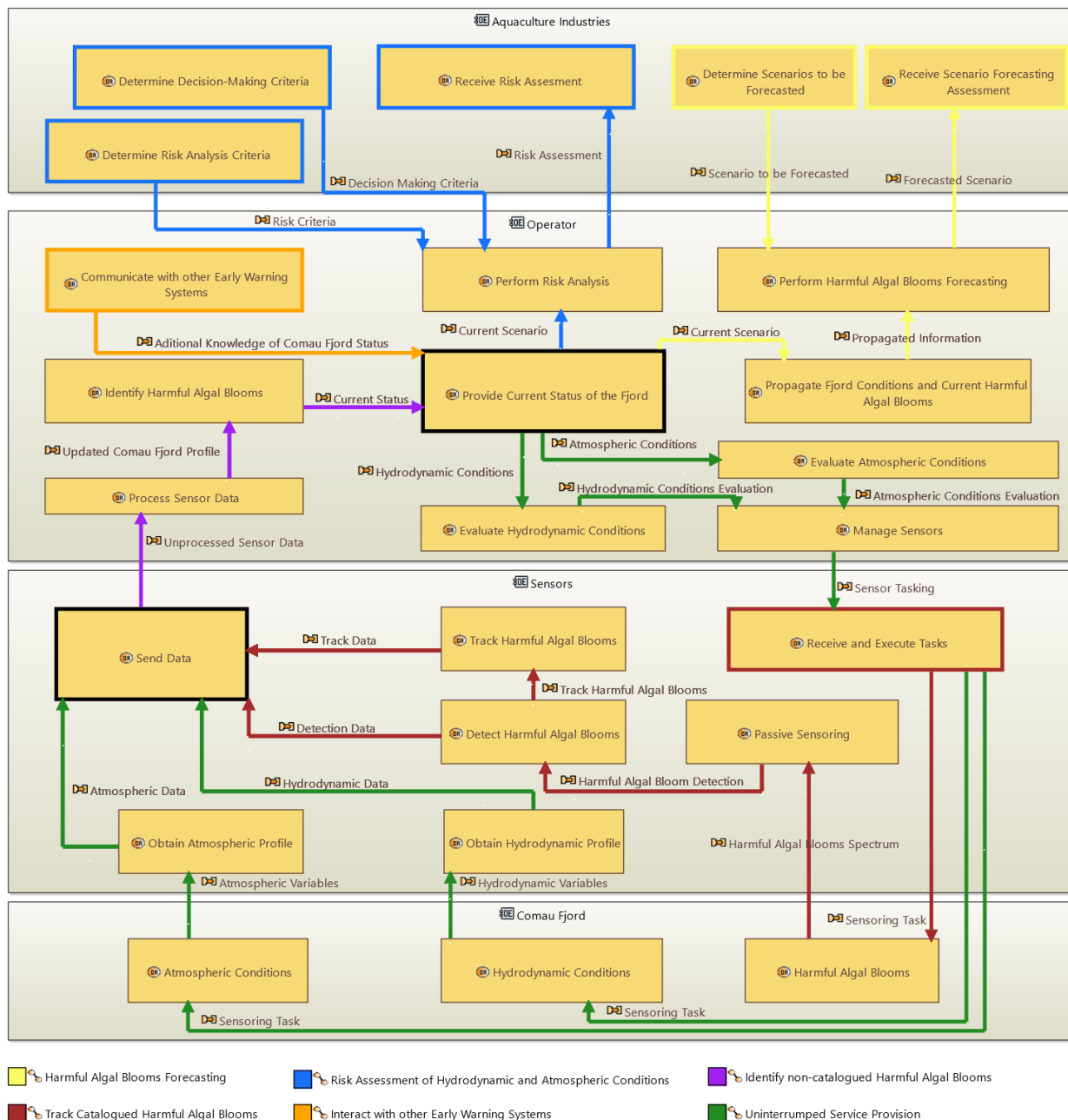


Figura 20. *Operational Architecture*. Elaboración propia.

Se tiene que las actividades operativas que deberán llevar a cabo las empresas acuícolas se relacionan principalmente a la toma de decisiones respecto a los criterios para determinar si un posible escenario es o no una amenaza, de esta manera, esta entidad operativa tendrá la flexibilidad de utilizar el sistema según sus intereses y necesidades.

Respecto al operador, este tendrá la responsabilidad de gestionar los sensores que se utilicen en la arquitectura, además de realizar las estimaciones de riesgo a partir de los criterios entregados por las empresas acuícolas. Adicionalmente, deberá ser el puente entre la arquitectura y el resto de sistemas de monitoreo y alerta temprana que pudiesen entregar información relevante respecto al estado del sitio de interés.

Los sensores deberán llevar a cabo actividades de percepción y monitoreo pasivo del volumen de agua de interés a modo de obtener su perfil hidrodinámico, su perfil atmosférico, y detectar los posibles eventos de afloramiento algal no catalogados.

El sitio de interés (fiordo Comau para este trabajo), tiene de manera inherente una serie de características y condiciones tales como velocidad del viento, velocidad de la columna de agua, cantidad de biomas, etc., que son de gran utilidad para realizar una estimación del riesgo de futuros afloramientos algales. Dichas propiedades inherentes se traducen en las tres actividades operativas presentes en la arquitectura operativa.

Una vez obtenida la arquitectura operativa, se da por finalizada la etapa de análisis operativo. Se han establecido las seis capacidades operativas a partir de la identificación de las necesidades de los *stakeholders*. Dichas capacidades deberán ser satisfechas por cuatro entidades operativas principales estrechamente relacionadas al sistema por diseñar. Para que las entidades sean capaces de lograr su cometido se establecieron múltiples actividades operativas, las cuales se interrelacionan a través de intercambios operativos consistentes en comunicaciones unidireccionales de información. Una vez alocadas las actividades se establecieron seis procesos operativos que corresponden al conjunto de actividades capaces de satisfacer una de las seis capacidades operativas definidas al inicio del análisis operativo.

Cabe destacar que los resultados expuestos en este capítulo corresponden al producto final de un proceso iterativo en el que se fueron refinando las capacidades, actividades y procesos de manera constante en base a la retroalimentación de los *stakeholders* involucrados en el trabajo. Dado que el análisis operativo se encuentra descrito en su totalidad, se procede con la siguiente etapa de la metodología ARCADIA: el análisis del sistema.

CAPÍTULO 4

En este capítulo se detalla la segunda fase de la metodología ARCADIA y su implementación en Capella para el desarrollo de la arquitectura conceptual.

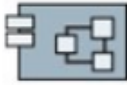





4 ANÁLISIS DEL SISTEMA

4.1 Definiciones previas y objetivo del análisis del sistema

El análisis del sistema (SA) busca definir las expectativas del sistema, es decir, lo que el sistema debe realizar para satisfacer a los *stakeholders*. Se construye un análisis funcional externo, basado en el análisis operativo realizado previamente en conjunto con la declaración de requisitos de alto nivel (Eclipse, 2022). Como resultado del análisis funcional externo se busca la identificación de funciones, servicios y comportamientos esperados del sistema. Es relevante aclarar que en esta etapa el sistema se trabaja bajo el concepto de caja negra, es decir, no contiene elementos estructurales, sólo funciones asignadas.

Es esencial limitar el análisis funcional realizado en el análisis del sistema a la captación de las necesidades, excluyendo cualquier elección o detalle de implementación. Esto permite mantener la libertad de elección durante el desarrollo posterior de la solución. Dentro del análisis del sistema se utiliza una nomenclatura específica la cual se expone en la Tabla 3.

Tabla 3. Conceptos del análisis del sistema. (Fuente: (Cerqueira, 2022))

Representación en Capella	Concepto
 Sistema	Conjunto organizado de elementos que funcionan como una unidad (caja negra) y responden a las necesidades de los usuarios. Un sistema posee puertos de componentes que le permiten actuar con actores externos.
 Actor	Cualquier elemento externo al sistema, ya sea humano o no-humano, que interactúe con él.
 Capacidad del sistema	Capacidad de un sistema de proveer un servicio de alto nivel con miras al cumplimiento de un objetivo operativo.
 Función	Comportamiento o servicio proporcionado por el sistema o por un actor (operativo u externo). Una función cuenta con puertos de función que le permiten comunicarse con las demás funciones. Notar que una función puede dividirse en subfunciones.
 Intercambio funcional	Intercambio de información entre dos funciones mediante el enlace de dos puertos de función.
 Cadena funcional	Elemento del modelo que permite designar un camino específico entre todos los posibles. Esto es especialmente útil para asignar restricciones.

4.2 Desarrollo del análisis del sistema en Capella

4.2.1 Identificación de actores y definición de capacidades del sistema

El primer paso en el análisis del sistema es aprovechar el trabajo realizado en el análisis operativo mediante la actualización automatizada que ofrece Capella para adaptar la nomenclatura y relaciones operativas a nomenclatura y relaciones del sistema. Esta es una de las ventajas más relevantes que justifican el uso de MBSE para el diseño de arquitecturas y sistemas, ya que permite generar trazabilidad entre las distintas etapas de la metodología.

Una vez realizada la transición automática es posible obtener de forma inmediata un diagrama conocido como *Context System Actors*, el cual permite capturar el sistema de interés y los actores de sistema, es decir, las entidades operativas definidas en el análisis operativo. De la Figura 21 es posible identificar que tres de las cuatro entidades operativas se convirtieron en actores de sistema, pues es necesaria su presencia para poder caracterizarlo de manera adecuada, no siendo así el caso de la entidad “industrias acuícolas” pues se entiende que esta representa los usuarios finales del sistema y por tanto sólo tiene las responsabilidades indicadas en el análisis operativo. Adicional a lo anterior, es posible verificar que el nombre que se le asigna al sistema es “sistema de gestión de sensores”, debido a que esta será la función principal del sistema en la arquitectura conceptual propuesta en este trabajo.

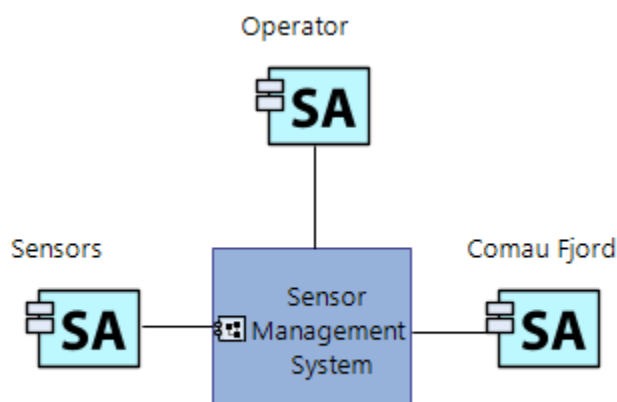


Figura 21. *Context System Actors*. Elaboración propia.

Posteriormente se definen cinco capacidades del sistema, es decir, servicios que debe proveer el sistema de gestión de sensores para que la arquitectura conceptual pueda contar con la propiedad emergente de alerta temprana:

- Seguimiento de floraciones algales nocivas catalogadas en el fiordo Comau.
- Prestación ininterrumpida de servicio.
- Identificación de floraciones algales nocivas no-catalogadas.
- Gestionar múltiples sensores.
- Predicción de eventos de afloramiento algal.

A primera vista es posible identificar que tres capacidades son directamente heredadas de las capacidades operativas establecidas en la fase previa. Las nuevas capacidades se relacionan directamente con el rol de gestión que tiene asignado el sistema. Cabe destacar que la capacidad de prestación de servicios se refiere a que el sistema debe estar disponible para el usuario (empresas acuícolas) el mayor tiempo posible en base a los sensores que utilice la arquitectura final.

Las capacidades de sistema a su vez son alocadas a actores específicos encargados de complementar y/o administrar al sistema para conseguir el cumplimiento de dichas capacidades. La Figura 22, conocida como *Capability Diagram* muestra los actores implicados, además de cuatro restricciones no funcionales (recuadros de color amarillo) que permiten especificar el perfil con el que deben contar dichos actores en esta arquitectura conceptual.

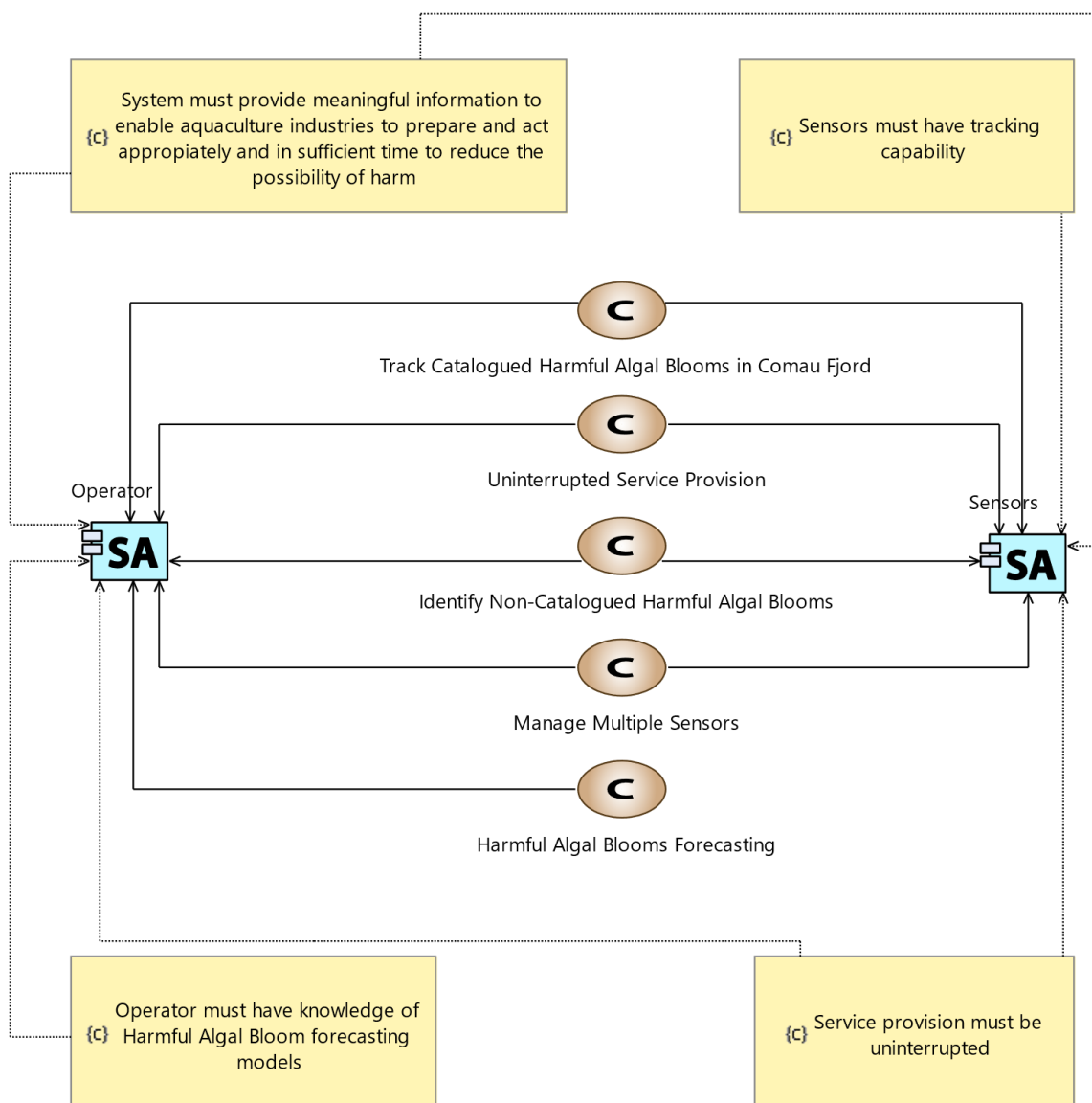


Figura 22. *Capability Diagram*. Elaboración propia.

4.2.2 Definición de funciones del sistema

Una vez establecido el rol principal del sistema, los actores que interactúan con éste y las capacidades que debe satisfacer el sistema para aportar a la arquitectura, se comienza la definición de las funciones de sistema, entendidas como comportamientos o servicios que debe proveer el sistema o los actores, como por ejemplo, detectar una amenaza, medir temperatura, etc. Las actividades operativas definidas en la fase previa pueden ser transformadas y refinadas en funciones del sistema, para posteriormente ser asignadas a un componente del sistema o bien a un actor. Naturalmente, la actividad de definición de funciones no es un simple refinamiento de las actividades operativas pues el objeto de estudio es un análisis diferente (Castro, 2023b), por ejemplo, varias actividades operativas pueden dar lugar a una misma función, o bien, una actividad operativa puede dar lugar a múltiples funciones. Incluso las funciones pueden aparecer sin corresponderse necesariamente con una actividad operativa, respondiendo netamente a una necesidad del sistema de interés.

Se destaca nuevamente la importancia de definir funciones relacionadas exclusivamente con las necesidades del sistema u actores apuntando a la satisfacción de las capacidades, discriminando cualquier elección de diseño no solicitado por los stakeholders, con el fin de preservar la mayor flexibilidad de diseño en fases posteriores (Roques, 2017).




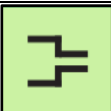

Una vez definidas todas las funciones, es necesario establecer canales de comunicación entre ellas a modo de que puedan intercambiar información. Lo anterior recibe el nombre de intercambio funcional. Al seleccionar una serie de intercambios funcionales es posible crear cadenas funcionales, que son particularmente útiles para describir el comportamiento esperado del sistema en un determinado contexto, y de esta manera llevar a cabo pruebas de verificación y validación según corresponda.

Dada la alta complejidad del sistema de gestión de sensores, se presentarán las funciones definidas en esta etapa en dos diagramas conocidos como *System Dataflow Breakdown*, los cuales cuentan con múltiples funciones interrelacionadas a través de intercambios funcionales, además de cadenas funcionales que permiten tener una mejor noción de la utilidad de ciertos grupos de funciones. El primer diagrama (Figura 23), presenta las funciones dirigidas hacia la gestión de la información captada por los sensores de la arquitectura, por ejemplo, la recolección de datos hidrodinámicos o atmosféricos del fiordo, el filtrado de dichos datos o su procesamiento con miras a la propagación en el tiempo para que el operador pueda generar una estimación del riesgo. El segundo diagrama (Figura 24), presenta las funciones dirigidas hacia la gestión que debe realizar el sistema sobre los sensores de la arquitectura para que estos se encuentren sincronizados correctamente, es decir, se debe garantizar que los datos de los distintos sensores de la arquitectura coincidan en el tiempo y el espacio.

En ambos diagramas, las funciones cuyo color de recuadro es azul claro son las que se asignarán a los actores, mientras que las funciones cuyo color de recuadro es verde claro son las que se asignarán al sistema. Los intercambios funcionales son representados por finas líneas de color verde donde un extremo es un puerto de salida representado por un cuadrado de color verde con una flecha blanca en el centro, mientras que el otro extremo es un puerto de entrada representado por un cuadrado de naranja verde con una flecha blanca en el centro. Finalmente, se tiene que las cadenas funcionales son representadas por líneas gruesas de colores. Notar que algunas funciones cuentan con un borde exterior de color negro, esto se debe a que dicha función forma parte de dos o más cadenas funcionales a la vez.

Es posible identificar elementos particulares en ambos diagramas consistentes en cuadrados de fondo verde con símbolos negros en el centro, dichos elementos se conocen como funciones de control de flujo, las cuáles actúan como intermediarias entre las fuentes y los destinatarios.

Tabla 4. Funciones de control de flujo. (Fuente: (Voirin, 2018a))

Representación en Capella	Concepto
 <i>Duplicate</i>	Esta función permite especificar una difusión simultánea de un intercambio funcional fuente a varios receptores. Es decir, transmite los mismos elementos de intercambio a todos los destinatarios.
 <i>Split</i>	Esta función permite especificar una difusión simultánea de algunos de los elementos de intercambio a cada destinatario de forma selectiva.
 <i>Route</i>	Esta función permite especificar la selección de uno o varios destinatarios potenciales, transmitiendo a cada destinatario sólo algunos de los elementos de intercambio recibidos.
 <i>Gather</i>	Esta función permite especificar la combinación de elementos de varios intercambios de diferentes fuentes, es decir, entrega un único elemento que combina los recibidos de distintas fuentes.
 <i>Select</i>	Esta función permite especificar la selección de una fuente entre muchas, dirigiendo sólo elementos procedentes de la fuente seleccionada (la mayoría de las veces sujeta a condiciones).

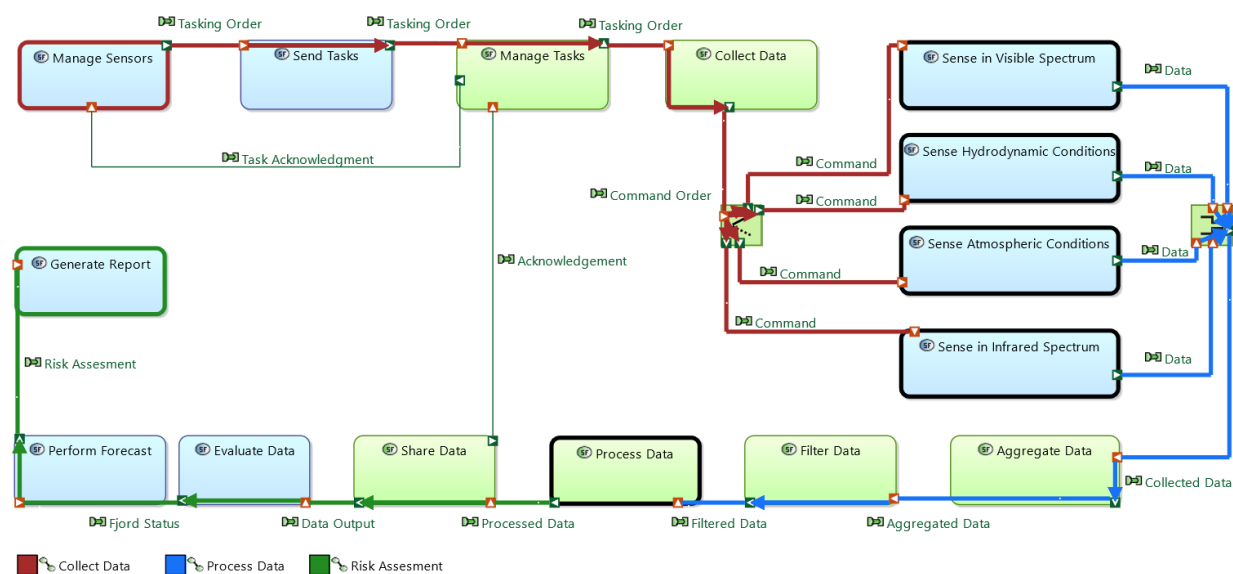


Figura 23. *Data Management Breakdown*. Elaboración propia.

La Figura 23 muestra que el proceso de gestión de datos de los sensores comienza desde el operador del sistema, el cual es responsable de enviar las tareas al sistema para que éste

procese dichas tareas con el objetivo de enviar los comandos asociados a cada uno de los sensores que asistan a la arquitectura. En particular, dichos sensores deben contar con la capacidad de recolectar información relacionada a las condiciones atmosféricas, las condiciones hidrodinámicas, y los espectros visibles e infrarrojos de la luz a modo de poder las variables críticas que caracterizan los eventos de floraciones algales nocivas. Posteriormente, dicha información es enviada desde los sensores al sistema, el cual reúne dichos datos y los almacena de una manera resumida, acción conocida como agregación de datos. Posteriormente los datos son filtrados según criterios pre-impuestos por el operador, para facilitar su posterior procesado y envío al operador, el que finalmente se encargará de utilizar dichos datos procesados para realizar la estimación de riesgo de eventos de afloramiento algal.

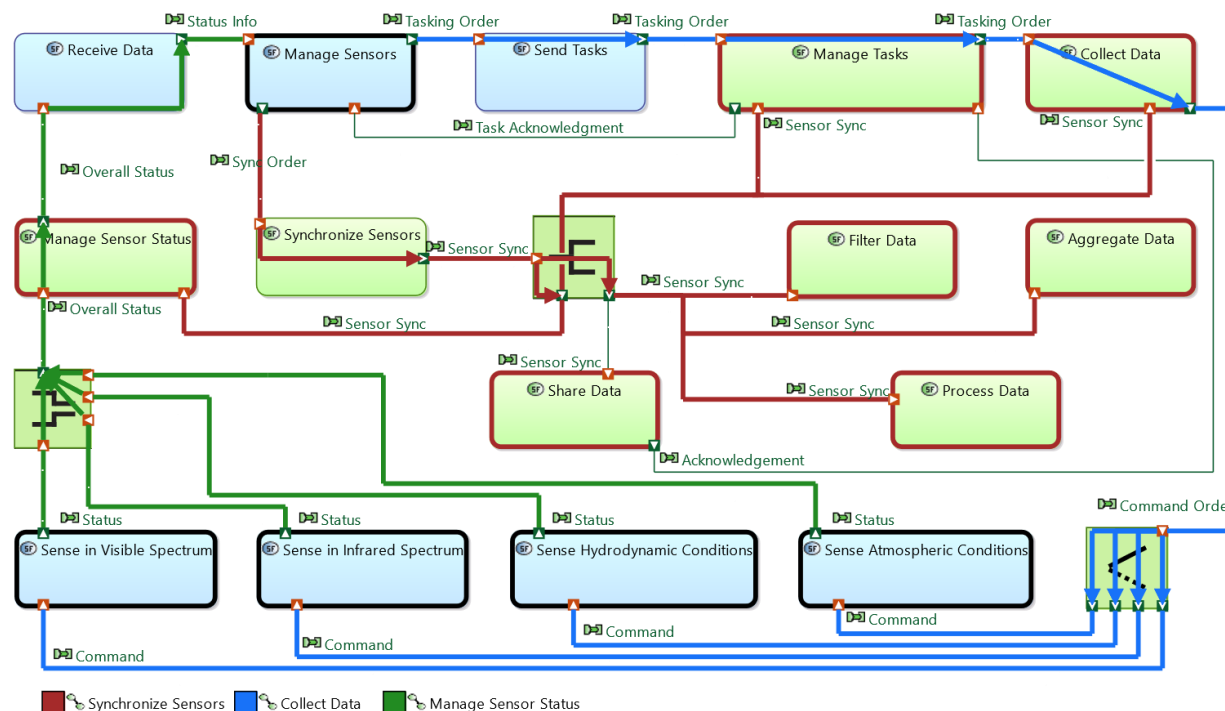


Figura 24. *Sensor Management Breakdown*. Elaboración propia.

La Figura 24 muestra que el proceso de gestión que debe realizar el sistema sobre los sensores de la arquitectura para que estos se encuentren sincronizados correctamente también comienza a partir del operador, el cual envía una orden de sincronización al sistema de gestión de sensores, el cual estará encargado de interpretar dicha orden y asignar referencias de tiempo y/o posición a cada una de las funciones involucradas en el flujo de datos para que estas sean consistentes a lo largo de la arquitectura. Notar que el enfoque utilizado para realizar esta sincronización se deja libre pues dicha operación depende de los sensores específicos que se utilicen. El objetivo final de la sincronización es garantizar que los datos recogidos por los distintos sensores reflejen con exactitud la misma realidad y puedan utilizarse conjuntamente para el análisis y/o toma de decisiones. También es posible identificar que los sensores además de la información recolectada deben enviar su estado, el cual debe contener información útil respecto de su calibración temporal, espacial, y estado general. El estado permite a la arquitectura contar con un flujo constante de información para poder realizar nuevas sincronizaciones y asegurarse que los sensores puedan operar de manera nominal.

4.2.3 Integración final del análisis del sistema

Una vez establecido el rol del sistema, los actores, las funciones, intercambios y cadenas funcionales, es posible integrar todos estos elementos en un solo diagrama conocido como *System Analysis Architecture* (Figura 25), el cual permite definir adicionalmente las interfaces entre el sistema y los actores. Es posible identificar que el sistema cuenta con ocho funciones de alto nivel y cuatro funciones de control de flujo, a partir de dichas funciones y con apoyo de las funciones realizadas por los actores la arquitectura es capaz de satisfacer las capacidades funcionales.

Es relevante recalcar el hecho de que tanto el operador como los sensores son agentes externos al sistema. Esto coincide con lo planteado en el análisis operativo y se justifica en el hecho de que, al no formar parte del sistema, es mucho más fácil cambiar o actualizar el operador y/o los sensores en función de las necesidades de los usuarios que utilicen esta arquitectura conceptual para el desarrollo de su propio sistema.

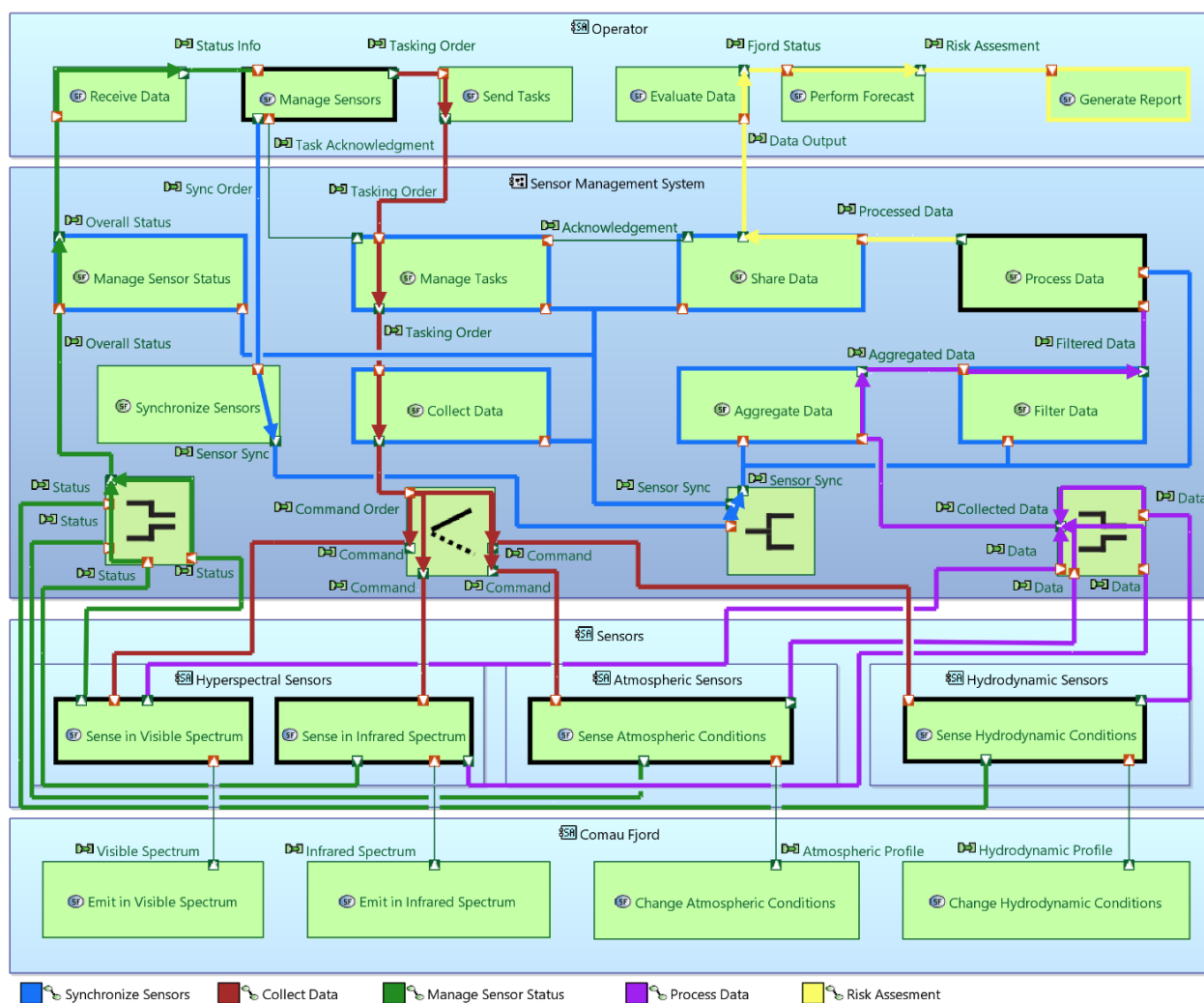


Figura 25. *System Analysis Architecture*. Elaboración propia.

Una vez obtenida la arquitectura del análisis del sistema, se da por finalizada la etapa de análisis del sistema. Se ha definido el rol principal del sistema de interés, así como los actores que aportarán junto a éste para cumplir las cinco capacidades del sistema establecidas. Posteriormente, se crearon múltiples funciones las cuales fueron alocadas al sistema y actores según el aporte particular que estos deben cumplir para el correcto funcionamiento de la arquitectura. Se generaron múltiples intercambios funcionales para crear canales de comunicación entre las funciones, además, se agruparon dichos intercambios funcionales en cinco grandes cadenas funcionales orientadas a la satisfacción de tareas específicas de alto nivel.

Al igual que en la fase anterior, los resultados expuestos en este capítulo corresponden al producto final de un proceso iterativo en el que se fueron refinando los actores, funciones y cadenas funcionales de manera constante en base a la retroalimentación de los *stakeholders* involucrados en el trabajo. Dado que el análisis del sistema se encuentra descrito en su totalidad, se procede con la tercera etapa de la metodología ARCADIA: la arquitectura lógica.

CAPÍTULO 5







En este capítulo se detalla la tercera fase de la metodología ARCADIA, que corresponde a la última fase para desarrollar de manera satisfactoria una arquitectura conceptual, adicionalmente se presenta su implementación en Capella.

5 ARQUITECTURA LÓGICA

5.1 Definiciones previas y objetivos de la arquitectura lógica

La arquitectura lógica (LA) responde a la pregunta: ¿cómo debe funcionar el sistema para cumplir las expectativas de los *stakeholders*? Para responder esta pregunta, es necesario tomar las primeras decisiones importantes a la hora de buscar un diseño o arquitectura solución. Dicha toma de decisiones se realiza a través del análisis funcional interno del sistema, en el cual se deben describir las funciones a realizar y como deben interactuar para implementar las funciones de servicio identificadas en la etapa previa (análisis del sistema). Posteriormente, se continúa con la identificación de los componentes operativos que implementen estas funciones de solución, integrando las restricciones no funcionales elegidas para ser abordadas en este nivel (Eclipse, 2022). Dentro de la etapa de arquitectura lógica se utiliza una nomenclatura específica la cual se expone en la Tabla 5.

Tabla 5. Conceptos de la arquitectura lógica. (Fuente: (Cerqueira, 2022))

Representación en Capella	Concepto
 Componente lógico	Elemento estructural del sistema que posee puertos estructurales para interactuar con otros componentes lógicos, así como con actores externos. Un componente lógico puede tener una o más funciones lógicas. Puede ser subdividido en subcomponentes lógicos.
 Actor lógico	Cualquier elemento externo al sistema, ya sea humano o no-humano, que interactúe con él.
 Función lógica	Comportamiento o servicio proporcionado por un componente u actor lógico. Una función lógica tiene puertos de función que le permiten comunicarse con otras funciones lógicas. Una función lógica puede subdividirse en subfunciones lógicas.
 Intercambio funcional	Intercambio de información o materia entre dos funciones lógicas a través de un enlace entre dos puertos de función.
 Intercambio de componentes	Conexión entre dos componentes lógicos y/o actores lógicos permitiendo la circulación de intercambios funcionales.
 Cadena funcional	Elemento del modelo que permite designar una ruta específica entre todas las posibles funciones e intercambios funcionales.

5.2 Desarrollo de la arquitectura lógica en Capella

Hasta el momento, el análisis funcional del sistema se ha realizado considerando las funciones como “cajas negras” de las cuales entra y sale información, sin considerar como dicha información es tratada. Lo anterior se hace para no limitar los posibles dominios de solución de la arquitectura conceptual, debido a que un error común a la hora de diseñar sistemas es adelantar la solución, ignorando posibles alternativas que den igual o mejor rendimiento (NASA, 2016).

El principio de la arquitectura lógica es comenzar a “abrir la caja” implementando grandes decisiones de la solución, en términos de principios de construcción y formas de cumplir las expectativas de los stakeholders. Lo anterior se formaliza mediante una descomposición en elementos estructurales abstractos llamados componentes lógicos (*logical components*). En el caso de la arquitectura desarrollada en este trabajo, dichos componentes lógicos corresponderán a cinco subsistemas:

- **Operational Management System:** Este sistema estará encargado de gestionar el estado de los sensores, por lo que recibirá el estado de cada sensor que utilice la arquitectura de manera independiente, para luego enviar un estado global de todos los sensores al operador. Adicionalmente, este sistema se encargará de gestionar todas las tareas que el operador envíe al sistema de gestión de sensores, haciendo de puente entre el operador y el resto de la arquitectura.
- **Data Handling System:** Este sistema estará encargado de agregar los datos recolectados por los sensores, filtrar dichos datos y enviarlos ya sea al sistema de procesamiento posterior a su filtrado o al operador para que éste los analice y determine si es que existe o no un alto riesgo de un posible evento FAN en el futuro cercano.
- **Synchronization System:** Este sistema estará encargado de realizar las tareas de sincronización temporal y espacial de los sensores. La metodología utilizada para realizar dicha sincronización se sigue planteando de manera abstracta debido a que depende estrechamente de los sensores que elija el potencial usuario que utilice la arquitectura conceptual de este trabajo para desarrollar su sistema.
- **Data Collection System:** Este sistema estará encargado de recibir las instrucciones del sistema de gestión operativa, interpretar dichas instrucciones y enviar los comandos que correspondan a cada uno de los sensores pertenecientes a la arquitectura.
- **Data Processing System:** Este sistema estará encargado de procesar los datos que reciba del sistema de manejo de datos, dichos datos serán propagados en el tiempo utilizando diferentes modelos que combinen variables hidrodinámicas y atmosféricas de fiordo Comau para poder obtener diferentes escenarios futuros que serán evaluados por el operador, quien finalmente determinará el riesgo de un posible evento FAN.

Una de las principales reglas a cumplir en esta fase es obligarse a excluir toda consideración tecnológica o elección de implementación, por lo que cualquier detalle o precisión de diseño que no influya en el comportamiento esperado del sistema no está justificado y se debe describir en la última fase de la metodología ARCADIA: la arquitectura física. Este principio es consistente con el objetivo principal del trabajo, pues se espera obtener una arquitectura conceptual (lógica) que sirva como marco de referencia para un usuario que desee diseñar su propio sistema de alerta temprana de floraciones algales nocivas.

Al igual que en el análisis del sistema, la herramienta Capella ofrece la opción de realizar una transición de los componentes de la arquitectura establecidos en etapas previas, a modo de conservar la consistencia a lo largo del diseño de la arquitectura conceptual. De esta manera, es posible crear de manera inmediata el diagrama integrador de esta fase de la metodología ARCADIA, conocido como *Logical Architecture* (Figura 26). Este diagrama cuenta con el mismo sistema y actores del análisis de sistema, además de las mismas funciones, intercambios y cadenas funcionales. La diferencia radica en la aparición de los componentes lógicos dentro del sistema con la respectiva asignación de las funciones de alto nivel en dichos subsistemas.

Se destaca que arquitectura conceptual considera el uso de múltiples sensores a modo de optimizar los parámetros de desempeño del sistema, tales como disponibilidad, cobertura y escalabilidad, entre otros. Otro aspecto para resaltar es que para el correcto funcionamiento de la arquitectura es fundamental que esta cuente con un operador (o un equipo de operadores) altamente capacitado, con conocimientos en el manejo del sistema y modelos predictivos de floraciones algales nocivas que utilicen datos hidrodinámicos y atmosféricos del sitio de interés.

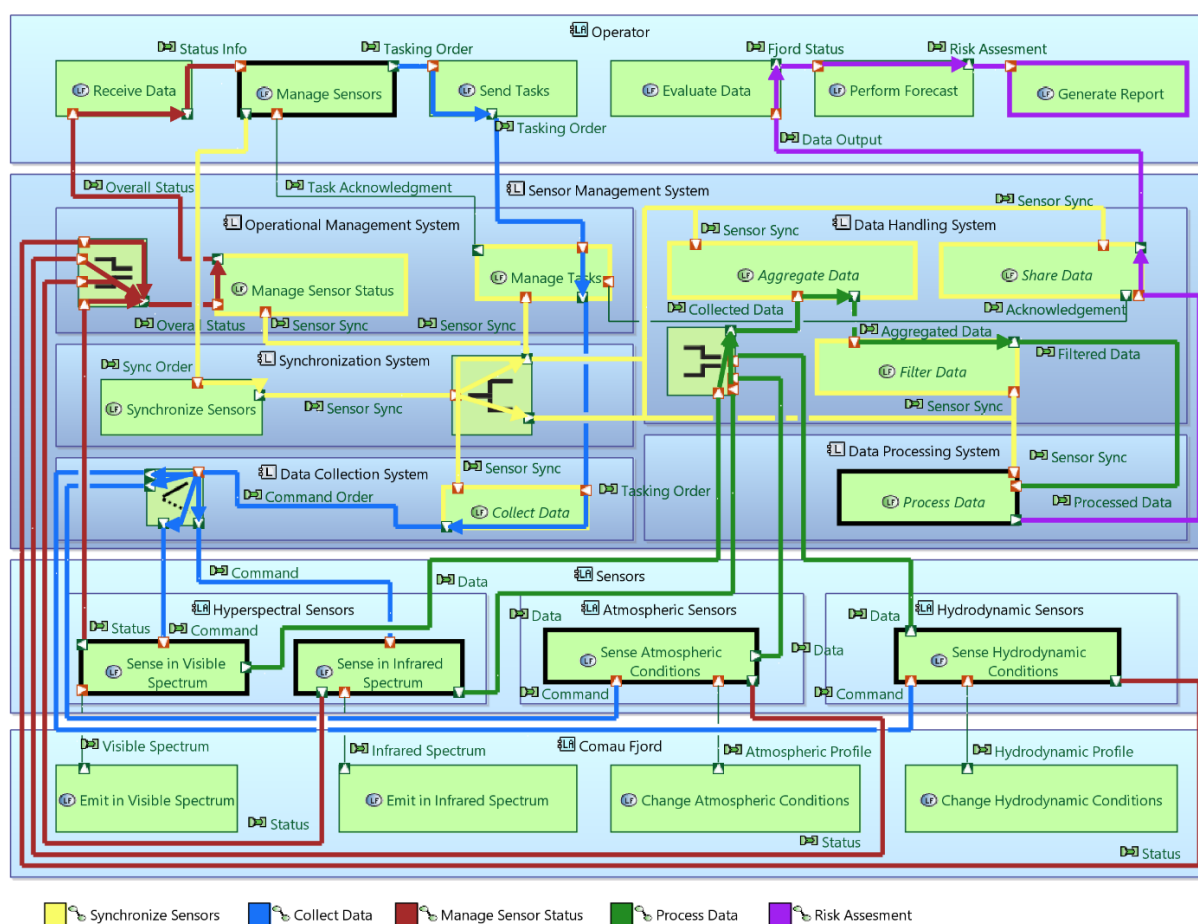


Figura 26. *Logical Architecture*. Elaboración propia.

Las funciones de alto nivel que forman parte del sistema de gestión de sensores, y que están relacionadas con el flujo de datos del fiordo Comau, es decir, recolección de datos, agregado de datos, filtrado de datos, procesamiento de datos y envío de datos, serán desglosadas a modo de refinar lo obtenido de la transición de la fase previa. De esta manera, dichas funciones (*parent functions*) serán el resultado emergente del trabajo conjunto de múltiples subfunciones (*child*

functions). Se destaca que sobre las cinco funciones de alto nivel se impone el requisito no funcional relacionado a que el servicio provisto por el sistema debe ser ininterrumpido, esto es para enfatizar al futuro usuario que utilice la arquitectura conceptual propuesta de tener este requisito en consideración.

La Figura 27 presenta el desglose de la función encargada de gestionar la recolección de datos. Se definen cuatro subfunciones:

- Recibir tareas: Esta función se encarga de recibir las tareas que entrega el sistema de gestión operacional, las cuales a su vez entregadas por el operador.
- Procesar tareas: Esta función se encarga de interpretar las tareas recibidas y traducirlas como comandos para cada uno de los sensores de la arquitectura.
- Enviar comandos a los sensores: Esta función se encarga de enviar los comandos a los sensores pertinentes.
- Mantener una base de datos de las tareas recibidas: El objetivo de esta función es contar con un respaldo de los *inputs* que reciba el sistema de recolección de datos en caso de que el operador necesite verificar las últimas tareas enviadas.

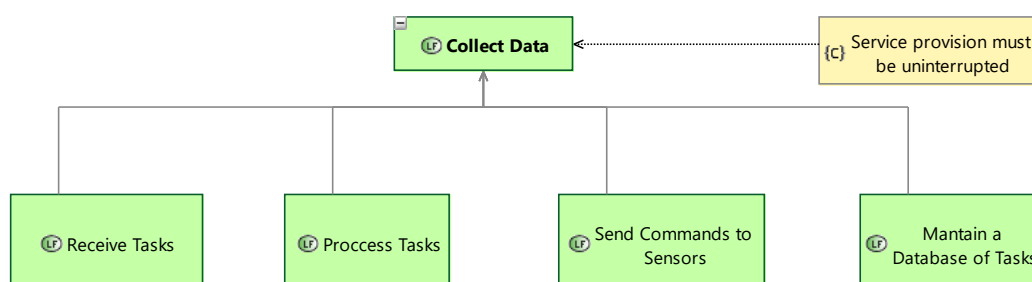


Figura 27. Desglose de función de recolección de datos. Elaboración propia.

La Figura 28 presenta el desglose de la función encargada de gestionar el agregado de datos. Se definen cinco subfunciones:

- Importar datos: Esta función se encarga de importar los datos recolectados por cada uno de los sensores de la arquitectura.
- Validar datos: Esta función se encarga de comprobar la integridad, exactitud y estructura de los datos.
- Correlacionar datos: Esta función se encarga de establecer correlaciones preliminares entre los datos con el objetivo de categorizarlos. Esta correlación se hace de acuerdo con la base de datos históricos presente en el sistema de manejo de datos.
- Gestionar datos históricos: Esta función se encarga de mantener una base histórica de los datos enviados por cada uno de los sensores de la arquitectura. Esta base de datos facilita la tarea de la función de correlación.
- Enviar datos agregados: Esta función se encarga de enviar los datos agregados (clasificados) a la función encargada de gestionar el filtrado de datos.

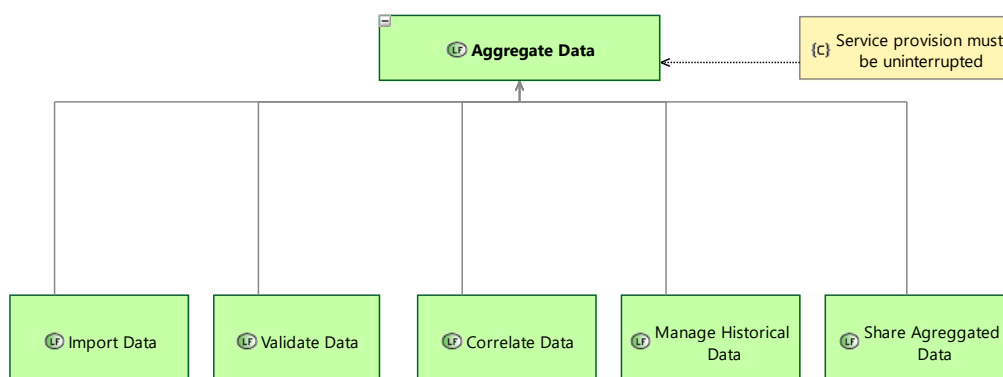


Figura 28. Desglose de función de agregado de datos. Elaboración propia.

La Figura 29 presenta el desglose de la función encargada de gestionar el filtrado de datos. Se definen siete subfunciones:

- Importar datos agregados: Esta función se encarga de importar los datos enviados por la función de agregado de datos.
- Clasificar datos: Esta función se encarga de clasificar los datos a partir de la correlación realizada en la función de agregado de datos.
- Excluir datos no deseados: Esta función se encarga de excluir los datos que no pasaron los criterios de validación establecidos en la función de agregado de datos.
- Ordenar datos: Esta función se encarga de ordenar los datos clasificados en un formato definido por el operador.
- Correlacionar datos: Esta función se encarga de establecer correlaciones entre los datos ordenados. Esta correlación se hace de acuerdo con la base de datos históricos presente en el sistema de manejo de datos.
- Gestionar datos históricos: Esta función se encarga de mantener una base histórica de los datos ordenados. Esta base de datos facilita la tarea de la función de correlación.
- Enviar datos filtrados: Esta función se encarga de enviar los datos filtrados a la función encargada de gestionar el procesamiento de datos.

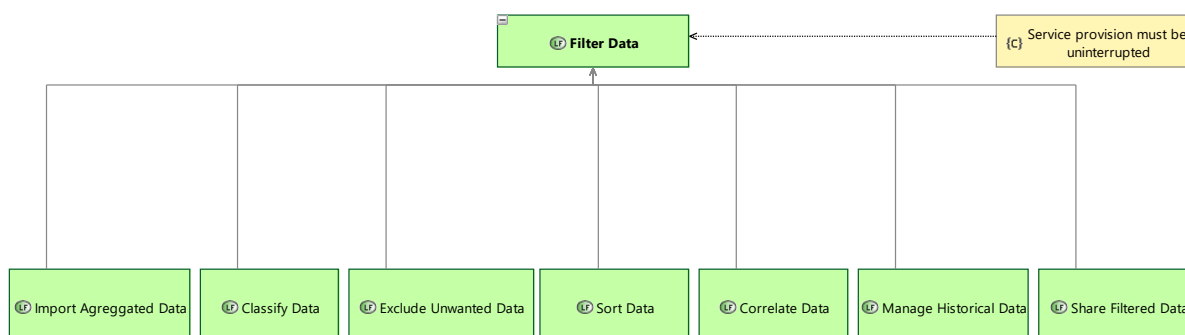


Figura 29. Desglose de función de filtrado de datos. Elaboración propia.

La Figura 30 presenta el desglose de la función encargada de gestionar el procesado de datos. Se definen seis subfunciones:

- Importar datos filtrados: Esta función se encarga de importar los datos enviados por la función de filtrado de datos.
- Correlacionar datos: Esta función se encarga de establecer correlaciones entre los datos calibrados y formateados. Esta correlación se hace de acuerdo con la base de datos históricos presente en el sistema de manejo de datos.
- Gestionar datos históricos: Esta función se encarga de mantener una base histórica de los datos calibrados y formateados. Esta base de datos facilita la tarea de la función de correlación.
- Calibrar datos: Esta función se encarga de corregir los datos medidos o bien permite registrar la incertidumbre asociada al conjunto de datos.
- Formateo de datos: Esta función se encarga de definir la estructura de los datos dentro de la base de datos con miras a su uso en modelos hidrodinámicos y atmosféricos.
- Envío de datos procesados: Esta función se encarga de enviar los datos procesados a la función encargada de gestionar el envío de datos para que estos sean despachados al operador.

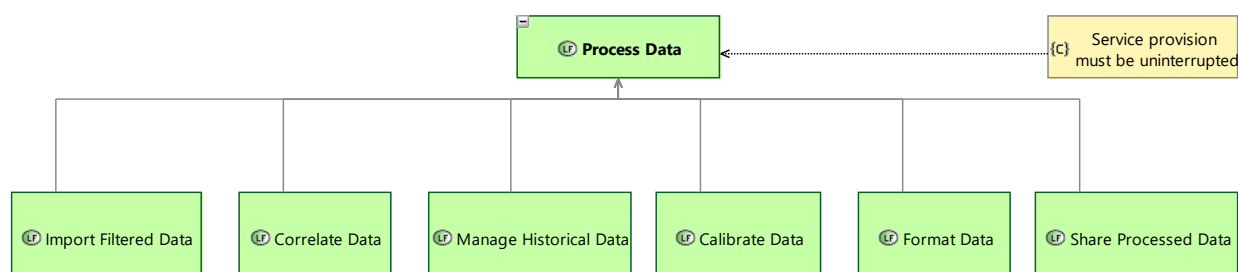


Figura 30. Desglose de función de procesado de datos. Elaboración propia.

La Figura 31 presenta el desglose de la función encargada de gestionar el envío de datos. Se definen seis subfunciones:

- Importar datos procesados: Esta función se encarga de importar los datos enviados por la función de procesado de datos.
- Reconocimiento del estado de las tareas en tiempo real: Esta función permite al operador verificar en tiempo real el estado de las tareas asignadas al sistema.
- Almacenamiento de datos: Esta función se encarga de almacenar los datos procesados más recientes para facilitar su acceso en caso de que el operador así lo requiera.
- Gestionar datos históricos: Esta función se encarga de mantener una base histórica de los datos procesados.

- Formateo de datos: Esta función verifica que el formateo de datos realizado en la función de procesamiento de datos se haya realizado de manera correcta, en caso contrario se encarga de definir correctamente la estructura de los datos.
- Envío de datos al operador: Esta función se encarga de enviar los datos procesados en el formato que el operador requiera para así realizar el análisis de riesgo de floraciones algales nocivas.

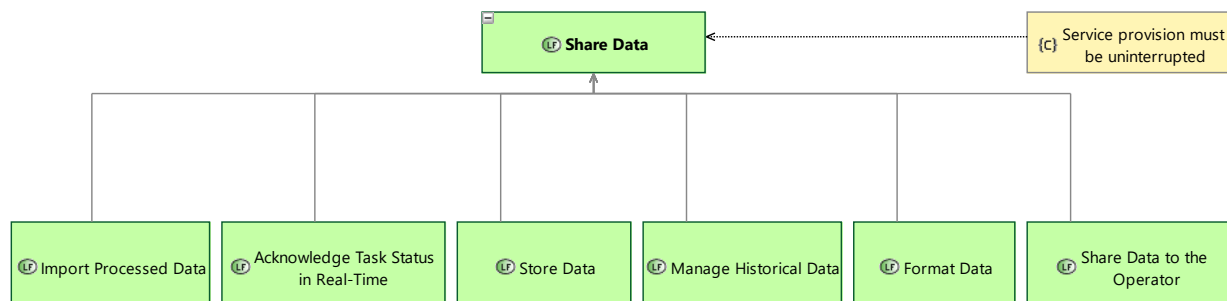


Figura 31. Desglose de función de envío de datos. Elaboración propia.

Una vez obtenida la arquitectura lógica y detallados los desgloses de las funciones de alto nivel, se da por finalizada la tercera fase de la metodología ARCADIA y, por consiguiente, queda completamente definida la arquitectura conceptual para un sistema de alerta temprana para floraciones algales nocivas. Partiendo de las definiciones realizadas en el análisis operativo y análisis del sistema, se crearon cinco elementos estructurales abstractos conocidos como componentes lógicos los que se integraron al sistema previo. Adicionalmente, las funciones de alto nivel relacionadas con el flujo de datos se detallaron completamente a través de desgloses funcionales en los que se presentan una serie de subfunciones que permiten que se lleve a cabo la función de alto nivel.

Al igual que en las fases anteriores, los resultados expuestos en este capítulo corresponden al producto final de un proceso iterativo en el que se fue refinando la arquitectura conceptual de manera constante en base a la retroalimentación de los *stakeholders* involucrados en el trabajo.

Se espera que los trabajos futuros tomen la arquitectura conceptual propuesta y continúen con la fase final de la metodología ARCADIA, conocida como arquitectura física, que debe definir en detalle cómo debe diseñarse y construirse el sistema para guiar la integración, verificación y validación (IVV) del mismo (Roques, 2017). En caso de completar la fase final, el usuario habrá completado la fase de diseño de un sistema de alerta temprana para floraciones algales nocivas y podrá continuar con el resto de las etapas del ciclo de vida de proyecto.

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSIONES

El presente trabajo detalla el desarrollo de una arquitectura conceptual para un sistema de alerta temprana de floraciones algales nocivas en la Patagonia chilena. Lo anterior fue realizado siguiendo la metodología ARCADIA, que consiste en un método estructurado dirigido a la definición y validación de la arquitectura de sistemas complejos de ingeniería, y que está implementada directamente en la herramienta de modelado Capella.

La arquitectura conceptual propuesta corresponde al producto final de un proceso iterativo en el que se fue refinando la arquitectura conceptual de manera constante en base a la retroalimentación de múltiples *stakeholders* involucrados en el trabajo, es decir, investigadores de elevado prestigio en la temática de afloramientos algales nocivos en Chile, y docentes con profundo conocimiento en el desarrollo de sistemas complejos.

La arquitectura conceptual considera un sistema de gestión de sensores compuesto por cinco subsistemas y ocho funciones de alto nivel encargadas de satisfacer capacidades relacionadas a la gestión del flujo de datos y la sincronización espacio-temporal de los sensores. Se destacan tres actores externos al sistema: operador de sistema, sensores y sitio de interés (fiordo Comau). Cada uno de los actores cuenta con su propio conjunto de funciones y trabaja en conjunto con el sistema de interés para generar la propiedad emergente de alerta temprana. Cabe recalcar que, al no formar parte del sistema en sí, los actores son fácilmente intercambiables por el usuario de la arquitectura conceptual. Esta es una decisión de diseño fundamentada en entregar mayor flexibilidad para cambiar dichos actores según cada necesidad particular, además que permite asegurar un mayor rango de soluciones para el problema.

En base a lo anterior, se concluye que se cumple la hipótesis de trabajo, dado que se desarrolló de manera satisfactoria una arquitectura conceptual de gran valor añadido, pues entrega un marco de referencia sólido para quien desee desarrollar su propio sistema de alerta temprana de floraciones algales nocivas.

Se espera que los trabajos futuros tomen la arquitectura conceptual propuesta y continúen con la fase final de la metodología ARCADIA, conocida como arquitectura física, que debe definir en detalle cómo debe diseñarse y construirse el sistema. En caso de completar la fase final, el potencial usuario de la arquitectura conceptual habrá completado la fase de diseño de un sistema de alerta temprana para floraciones algales nocivas y podrá continuar con el resto de las etapas del ciclo de vida de proyecto.

Bibliografía

- [1]. Aguayo, R., Muñoz, J. L., Garreaud, R., & Montecinos, A. (2021). Hydrological droughts in the southern Andes (40 – 45 ° S) from an ensemble experiment using CMIP5 and CMIP6 models. *Scientific Reports*, 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84807-4>
- [2]. Anderson, D. M. (2009). Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs). *Ocean and Coastal Management*, 52(7), 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.04.006>
- [3]. Baek, S. S., Pyo, J. C., Kwon, Y. S., Chun, S. J., Baek, S. H., Ahn, C. Y., Oh, H. M., Kim, Y. O., & Cho, K. H. (2021). Deep Learning for Simulating Harmful Algal Blooms Using Ocean Numerical Model. *Frontiers in Marine Science*, 8(October), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.729954>
- [4]. Buschmann, A., Farías, L., Tapia, F., Varela, D., & Vásquez, M. (2016). Comisión Marea Roja. *Universidad de Los Lagos*, 64. http://www.subpesca.cl/portal/616/articles-95146_documento.pdf
- [5]. Cameron, B., & Adsit, D. M. (2020). Model-Based Systems Engineering Uptake in Engineering Practice. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(1), 152–162. <https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2863041>
- [6]. Capella MBSE Tool - What is MBSE. (2022). https://www.eclipse.org/capella/what_is_mbse.html
- [7]. Castro, H. (2023a). *MBSE with Arcadia method step-by-step: Operational Analysis*. <https://www.linkedin.com/pulse/mbse-arcadia-method-step-by-step-holder-castro/>
- [8]. Castro, H. (2023b). *MBSE with Arcadia method step-by-step: System Analysis*. <https://www.linkedin.com/pulse/mbse-arcadia-method-step-by-step-system-analysis-holder-castro/?trackingId=jitAOUySSp%2BRMmRcMD9ubw%3D%3D>
- [9]. Cerqueira, C. (2022). *LEC-003 - CAPELLA PRIMER v2*. IEA-S Departamento de Sistemas Espaciales.
- [10]. Cheng, K. H., Chan, S. N., & Lee, J. H. W. (2020). Remote sensing of coastal algal blooms using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Marine Pollution Bulletin*, 152(August 2019), 110889. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110889>
- [11]. Cloutier, R., & Hutchinson, N. (2021). *Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge* (Issue May). <http://g2sebok.incose.org/app/mss/menu/index.cfm>
- [12]. Crawley, E., Cameron, B., & Selva, D. (2015). *Systems Architecture: Strategy and Product Development for Complex Systems*.
- [13]. Delligatti, L. (2014). *SysML Distilled*.

- [14]. Díaz, P. A., Pérez-Santos, I., Basti, L., Garreaud, R., Pinilla, E., Barrera, F., Tello, A., Schwerter, C., Arenas-Uribe, S., Soto-Riquelme, C., Navarro, P., Díaz, M., Álvarez, G., Linfoord, P. M., Altamirano, R., Mancilla-Gutiérrez, G., Rodríguez-Villegas, C., & Figueroa, R. I. (2023). The impact of local and climate change drivers on the formation, dynamics, and potential recurrence of a massive fish-killing microalgal bloom in Patagonian fjord. *Science of the Total Environment*, 865(November 2022), 161288. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161288>
- [15]. Eclipse. (2022a). *Datasheet Arcadia*.
- [16]. Eclipse. (2022b). *capella/49. Logical Architecture.mediawiki at master · eclipse/capella · GitHub*.
[https://github.com/eclipse/capella/blob/master/doc/plugins/org.polarsys.capella.glossary.doc/html/Glossary/49. Logical Architecture.mediawiki](https://github.com/eclipse/capella/blob/master/doc/plugins/org.polarsys.capella.glossary.doc/html/Glossary/49.Logical%20Architecture.mediawiki)
- [17]. Eclipse. (2022c). *capella/60. Operational Analysis.mediawiki at master · eclipse/capella · GitHub*.
[https://github.com/eclipse/capella/blob/master/doc/plugins/org.polarsys.capella.glossary.doc/html/Glossary/60. Operational Analysis.mediawiki](https://github.com/eclipse/capella/blob/master/doc/plugins/org.polarsys.capella.glossary.doc/html/Glossary/60.Operational%20Analysis.mediawiki)
- [18]. Eclipse. (2022d). *capella/88. System Analysis.mediawiki at master · eclipse/capella · GitHub*.
[https://github.com/eclipse/capella/blob/master/doc/plugins/org.polarsys.capella.glossary.doc/html/Glossary/88. System Analysis.mediawiki](https://github.com/eclipse/capella/blob/master/doc/plugins/org.polarsys.capella.glossary.doc/html/Glossary/88.System%20Analysis.mediawiki)
- [19]. FAO. (2019). *Fishery and Aquaculture Statistics*.
- [20]. Fillinger, L., & Richter, C. (2013). Vertical and horizontal distribution of desmophyllum dianthus in Comau Fjord, Chile: A cold-water coral thriving at low pH. *PeerJ*, 2013(1), 1–22. <https://doi.org/10.7717/peerj.194>
- [21]. Forsberg, K., Mooz, H., & Cotterman, H. (2005). Visualizing Project Management. In *Quality Management Journal* (Vol. 4, Issue 4). <https://doi.org/10.1080/10686967.1998.11919151>
- [22]. Friedenthal, S. (2022). *What is a Model? - SEBoK*. https://www.sebokwiki.org/wiki/What_is_a_Model%3F
- [23]. Germán, A., Andreo, V., Tauro, C., Scavuzzo, C. M., & Ferral, A. (2020). A novel method based on time series satellite data analysis to detect algal blooms. *Ecological Informatics*, 59(April), 101131. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101131>

- [24]. Guan, W., Bao, M., Lou, X., Zhou, Z., & Yin, K. (2022). Monitoring, modeling and projection of harmful algal blooms in China. *Harmful Algae*, 111(November 2021), 102164. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102164>
- [25]. Knoll, D. (2019). *Model-based processes and tools for concurrent conceptual design of space systems*. <https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2019/12/thesis25.pdf>
- [26]. León-Munõz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- [27]. Mardones, J. I., Bolch, C., Varela, D., Untari, L., & Hallegraeff, G. M. (2014). *Mating compatibility and encystment characteristics of Alexandrium catenella dinoflagellate strains from Chilean southern fjords*.
- [28]. Mardones, J. I., Paredes, J., Godoy, M., Suarez, R., Norambuena, L., Vargas, V., Fuenzalida, G., Pinilla, E., Artal, O., Rojas, X., Dorantes-Aranda, J. J., Lee Chang, K. J., Anderson, D. M., & Hallegraeff, G. M. (2021). Disentangling the environmental processes responsible for the world's largest farmed fish-killing harmful algal bloom: Chile, 2016. *Science of the Total Environment*, 766, 144383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144383>
- [29]. Mardones, J. I., Paredes-Mella, J., Flores-Leñero, A., Yarimizu, K., Godoy, M., Artal, O., Corredor-Acosta, A., Marcus, L., Cascales, E., Pablo Espinoza, J., Norambuena, L., Garreaud, R. D., González, H. E., & Iriarte, J. L. (2022). Extreme harmful algal blooms, climate change, and potential risk of eutrophication in Patagonian fjords: insights from an exceptional Heterosigma akashiwo fish-killing event. *Progress in Oceanography*, 210(November 2022), 102921. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102921>
- [30]. Mardones, J. I., Paredes-Mella, J., Flores-Leñero, A., Yarimizu, K., Godoy, M., Artal, O., Corredor-Acosta, A., Marcus, L., Cascales, E., Pablo Espinoza, J., Norambuena, L., Garreaud, R. D., González, H. E., & Iriarte, J. L. (2023). Extreme harmful algal blooms, climate change, and potential risk of eutrophication in Patagonian fjords: Insights from an exceptional Heterosigma akashiwo fish-killing event. *Progress in Oceanography*, 210(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102921>
- [31]. Montes, R. M., Rojas, X., Artacho, P., Tello, A., & Quiñones, R. A. (2018). Quantifying harmful algal bloom thresholds for farmed salmon in southern Chile. *Harmful Algae*, 77(May), 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.05.004>
- [32]. NASA. (2016). NASA System Engineering Handbook Revision 2. *National Aeronautics and Space Administration*, 297.

- [33]. Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, *591*(7851), 551–563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- [34]. NDIA Systems Engineering Division. (2011). *Final report of the model based engineering (MBE) subcommittee. February*, 60. <https://www.ndia.org/-/media/sites/ndia/meetings-and-events/3187-sullivan/divisions/systems-engineering/modeling-and-simulation/reports/model-based-engineering.ashx>
- [35]. Noh, J. H., Kim, W., Son, S. H., Ahn, J. H., & Park, Y. J. (2018). Remote quantification of cochlodinium polykrikoides blooms occurring in the East Sea using geostationary ocean color imager (GOCI). *Harmful Algae*, *73*, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2018.02.006>
- [36]. Poblete, E. G., Drakeford, B. M., Ferreira, F. H., Barraza, M. G., & Failler, P. (2019). The impact of trade and markets on Chilean Atlantic salmon farming. *Aquaculture International*, *27*(5), 1465–1483. <https://doi.org/10.1007/s10499-019-00400-7>
- [37]. Rodríguez-Benito, C. V., Navarro, G., & Caballero, I. (2020). Using Copernicus Sentinel-2 and Sentinel-3 data to monitor harmful algal blooms in Southern Chile during the COVID-19 lockdown. *Marine Pollution Bulletin*, *161*(July), 111722. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111722>
- [38]. Roques, P. (2017). Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method: A Practical Guide to Capella. In *Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method: A Practical Guide to Capella*. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00854-9>
- [39]. Ryschkewitsch, M., Schaible, D., & Larson, W. (2009). The art and science of systems engineering. *Systems Research Forum*, *3*(2), 81–100. <https://doi.org/10.1142/S1793966609000080>
- [40]. Salazar, L., & Dresdner, J. (2023). Do Chilean imports lead prices in the EU mussel market? *Aquaculture Economics and Management*, *27*(2), 207–220. <https://doi.org/10.1080/13657305.2022.2089771>
- [41]. Sandoval, M., Parada, C., & Torres, R. (2018). Forecasting harmful algal blooms in Chile 1 Proposal of an integrated system for forecasting Harmful Algal Blooms (HAB) in Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res*, *46*(2), 424–451. <https://doi.org/10.3856/vol46-issue2-fulltext-18>
- [42]. Sawtell, R. W., Anderson, R., Tokars, R., Lekki, J. D., Shuchman, R. A., Bosse, K. R., & Sayers, M. J. (2019). Real time HABs mapping using NASA Glenn hyperspectral imager. *Journal of Great Lakes Research*, *45*(3), 596–608. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.02.007>

- [43]. SEBoK. (2022). [https://www.sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_\(SEBoK\)](https://www.sebokwiki.org/wiki/Guide_to_the_Systems_Engineering_Body_of_Knowledge_(SEBoK))
- [44]. Sernapesca. (2023). *Principales datos de la industria - Consejo del Salmón*. <https://www.consejodelsalmon.cl/informacion-de-la-industria/principales-datos-de-la-industria/>
- [45]. Shashank, A. (2019). *EVALUATING ARCADIA/CAPELLA VS. OOSEM/SYSML FOR SYSTEM ARCHITECTURE DEVELOPMENT* (Issue August). Purdue University.
- [46]. Soto, D., León-Muñoz, J., Garreaud, R., Quiñones, R. A., & Morey, F. (2021). Scientific warnings could help to reduce farmed salmon mortality due to harmful algal blooms. *Marine Policy*, 132(May), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104705>
- [47]. Tewari, K. (2022). A Review of Climate Change Impact Studies on Harmful Algal Blooms. *Phycology*, 2(2), 244–253. <https://doi.org/10.3390/phycology2020013>
- [48]. Voirin, J.-L. (2018a). Concepts of Functional and Operational Description. *Model-Based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method*, 289–303. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-169-7.50017-2>
- [49]. Voirin, J.-L. (2018b). Definition of the Principle Architecture or Logical Architecture. *Model-Based System and Architecture Engineering with the Arcadia Method*, 85–112. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78548-169-7.50007-x>
- [50]. Voirin, J.-L. (2023). *ARCADIA ENGINEERING LANDSCAPE*.
- [51]. Waite, R., Beveridge, M., Brummett, R., Castine, S., Chaiyawannakarn, N., Kaushik, S., Mungkung, R., Nawapakpilai, S., & Phillips, M. (2014). Improving productivity and environmental performance of aquaculture. *Creating a Sustainable Food Future*, June, 1–60.
- [52]. Wells, M. L., Karlson, B., Wulff, A., Kudela, R., Trick, C., Asnaghi, V., Berdalet, E., Cochlan, W., Davidson, K., De Rijcke, M., Dutkiewicz, S., Hallegraeff, G., Flynn, K. J., Legrand, C., Paerl, H., Silke, J., Suikkanen, S., Thompson, P., & Trainer, V. L. (2020). Future HAB science: Directions and challenges in a changing climate. *Harmful Algae*, 91(June 2019). <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.101632>
- [53]. Wen, J., Yang, J., Li, Y., & Gao, L. (2022). Harmful algal bloom warning based on machine learning in maritime site monitoring. *Knowledge-Based Systems*, 245, 108569. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108569>
- [54]. Wu, D., Li, R., Zhang, F., & Liu, J. (2019). A review on drone-based harmful algae blooms monitoring. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4).