



**Títol del Treball:**

**Aplicació d'una anàlisi multicriteri per a l'avaluació de diferents solucions basades en la natura pel tractament d'aigua residual.**

**Estudiant:** Ferran Ferrer Coma

**Correu electrònic:** Ferriferrer45@gmail.com

**Grau en Ciències Ambientals**

**Tutor acadèmic:** Joaquim Comas Matas

**Correu electrònic:** Joaquim.comas@udg.edu

**Cotutor director:** Josep Pueyo-Ros

**Correu electrònic:** jpueyo@icra.cat

**Empresa/Institució:** ICRA

**Data de dipòsit de la memòria a través de la plataforma de TFG:** 7 de juny 2024

# AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair a l'Institut Català de Recerca de l'Aigua per confiar en mi per realitzar aquest treball i donar-me l'oportunitat de conèixer més sobre l'anàlisi multicriteri i les solucions naturals de tractament d'aigües residuals. Més atentament, vull agrair els meus dos tutors, en Josep i en Joaquim, per ajudar-me i assessorar-me al llarg del treball.

En últim lloc, crec que és important donar les gràcies als meus pares per recolzar-me durant els quatre anys de la carrera i ajudar-me a poder realitzar els estudis amb tranquil·litat. També m'agradaria agrair als meus amics de la universitat i als meus germans per estar sempre al meu costat. Gràcies a tots.

# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA, SOSTENIBILITAT I PERSPECTIVA DE GÈNERE</b>	<b>IV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJECTIVES</b>	<b>2</b>
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>3</b>
3.1 ANÀLISI MULTICRITERI	3
3.1.1 ANÀLISI ESTADÍSTIC DE COMPARACIÓ DE VARIABLES I INDICADORS	5
3.2 VIES DE RECERCA D'INFORMACIÓ	5
3.3 RECOPIACIÓ I TRACTAMENT DE DADES	6
<b>4. RESULTATS</b>	<b>9</b>
4.1 IDENTIFICACIÓ D'ASPECTES IMPORTANTS	9
4.2 FORMULACIÓ DELS INDICADORS	10
4.3 PONDERACIÓ I RÀNQUING	19
4.4 RESULTATS DE L'APLICACIÓ	21
4.5 RELACIÓ ENTRE ELS DIFERENTS CRITERIS I INDICADORS	23
<b>5. DISCUSSIÓ</b>	<b>25</b>
<b>6. LIMITACIONS DEL PROJECTE I DESENVOLUPAMENT PEL FUTUR</b>	<b>25</b>
<b>7. CONCLUSIONS</b>	<b>26</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>27</b>

## RESUM

Hi ha un moviment popular d'organitzacions sobre els drets humans que intenta abordar la desigualtat en la distribució i ús d'aigua sanejada. Per solucionar aquest problema s'estan desenvolupant noves tecnologies com solucions naturals per al tractament d'aigua residual. Aquestes solucions basades en la natura no només presenten beneficis en el medi natural sinó que, en alguns casos, són millors solucions que la instal·lació d'un sistema convencional de depuració. L'objectiu d'aquest estudi és proporcionar un marc de referència d'una anàlisi multicriteri. Es pretén ajudar en el desenvolupament d'una eina de l'Institut Català de Recerca de l'Aigua per a la selecció de la millor tecnologia basada en la natura per al tractament d'aigua residual segons les condicions de l'usuari.

L'eina utilitza una anàlisi multicriteri per comparar les solucions aptes segons les condicions de l'usuari. Aquesta anàlisi és un sistema de presa de decisions basat en diferents criteris i indicadors.

L'anàlisi multicriteri consta de quatre fases. Primer, es du a terme una anàlisi d'identificació del context i dels actors implicats per poder plantejar diferents criteris i indicadors, ajudats d'una recerca bibliogràfica de diferents anàlisis multicriteri similars. Així doncs, en l'estudi s'han desenvolupat 19 indicadors i 6 criteris. Després de plantejar el context i determinar els indicadors i criteris, comença una fase de formulació i quantificació dels indicadors. Ja determinats els càlculs i les dades utilitzades per quantificar els indicadors, es calculen els diferents criteris amb una mitjana ponderada i es fan diferents escenaris de ponderació. Principalment, es presenten cinc situacions diferents on es divideixen les tecnologies per la seva capacitat de tractar diferents tipologies d'aigua residual i en cada situació es plantegen cinc escenaris. L'última fase que s'aplica és una comparació de diferents indicadors i variables per avaluar l'estructura de l'anàlisi.

Ja realitzats tots els càlculs, es comparen els diferents rànquings obtinguts i principalment es pot observar un patró global, on la tecnologia millor valorada i pitjor valorada en la majoria d'escenaris és la mateixa que en els escenaris de referència de puntuacions iguals. Això indica la robustesa de l'anàlisi i el bon desenvolupament dels diferents criteris i indicadors.

## RESUMEN

Hay un movimiento popular de organizaciones sobre los derechos humanos que intenta abordar la desigualdad en la distribución y uso de agua saneada. Para solucionar este problema, se están desarrollando nuevas tecnologías como soluciones naturales para el tratamiento de agua residual. Estas soluciones basadas en la naturaleza no solo presentan beneficios en el medio natural, sino que en algunos casos son mejores que la instalación de un sistema convencional de depuración. El objetivo de este estudio es proporcionar un marco de referencia para un análisis multicriterio. Se pretende ayudar en el desarrollo de una herramienta del Instituto Catalán de Investigación del Agua para la selección de la mejor tecnología basada en la naturaleza para el tratamiento de agua residual según las condiciones del usuario.

La herramienta utilizar un análisis multicriterio para comparar las soluciones aptas según las condiciones del usuario. Este análisis es un sistema de toma de decisiones basado en diferentes criterios e indicadores.

El análisis multicriterio consta de cuatro fases. Primero, se lleva a cabo un análisis de identificación del contexto y de los actores implicados para poder plantear diferentes criterios e indicadores, apoyados por una investigación bibliográfica de diferentes análisis multicriterio similares. El estudio ha desarrollado 19 indicadores y 6 criterios. Después de plantear el contexto y determinar los indicadores y criterios, empieza una fase de formulación y cuantificación de los indicadores. Ya determinados los cálculos y los datos utilizados para cuantificar los indicadores, se calculan los diferentes criterios con una media ponderada y se realizan diferentes escenarios de ponderación. Principalmente, se presentan cinco situaciones diferentes donde se dividen las tecnologías por su capacidad de tratar diferentes tipologías de agua residual y en cada situación se plantean cinco escenarios. La última fase que se aplica es una comparación de diferentes indicadores y variables para evaluar la estructura del análisis.

Ya realizados todos los cálculos, se comparan los diferentes rankings obtenidos y principalmente se puede observar un patrón global, donde la tecnología mejor valorada y peor valorada en la mayoría de escenarios es la misma que en los escenarios de referencia de puntuaciones iguales. Esto indica la robustez del análisis y el buen desarrollo de los diferentes criterios e indicadores.

## ABSTRACT

There is a popular movement of human rights organizations trying to address inequality in the distribution and use of clean water. To address this problem, new technologies are being developed as natural solutions for wastewater treatment. These natural solutions benefit the environment and, in some cases, are better than conventional wastewater treatment systems. The objective of this study is to provide a reference framework for a multi-criteria analysis. It aims to help in the development of a tool for the Catalan Water Research Institute to select the best natural technology for wastewater treatment according to user conditions.

The tool uses a multi-criteria analysis to compare suitable solutions according to user conditions. This analysis is a decision-making system based on different criteria and indicators.

The multi-criteria analysis consists of four phases. First, an analysis of the context and the actors involved must be carried out in order to come up with different criteria and indicators, supported by a bibliographical research of other multi-criteria analyses. The study has developed 19 indicators and 6 criteria. After setting the context and determining the indicators and criteria, a phase of formulation and quantification of the indicators begins. Once the calculations and data used to quantify the indicators have been determined, the criteria are calculated with a weighted average and different weighting scenarios are carried out. Mainly, five situations are presented where the technologies are divided by their capacity to treat different types of wastewater and in 5 scenarios are presented for each situation. The last phase is a comparison of different indicators and variables to evaluate the structure of the analysis.

Once all calculations have been made, the rankings obtained are compared. An overall pattern can be observed where the best and worst rated technology in most scenarios is the same as in the reference scenarios with equal scores. This indicates the robustness of the analysis and the good development of the different criteria and indicators.

## REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA, SOSTENIBILITAT I PERSPECTIVA DE GÈNERE

### ***REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA***

Al llarg de l'estudi, s'ha pogut analitzar el funcionament i les característiques de l'anàlisi multicriteri. Aquesta és una eina clau en la presa de decisions, però al mateix temps pot causar un dèficit del criteri propi de les persones. És important tenir en compte que els éssers humans disposem de criteri propi i llibertat en la presa de decisions, i l'ús abusiu de l'anàlisi multicriteri pot arribar a generar una falsa confiança. A més, la confiança i la dependència que podem desenvolupar en l'anàlisi ens pot arribar a limitar i fer passar per alt aspectes que, a simple vista, podrien ser reconeguts. Per tant, és important utilitzar aquests sistemes amb responsabilitat i com a suport addicional, però és crucial no substituir el criteri humà en la presa de decisions.

### ***REFLEXIÓ SOBRE SOSTENIBILITAT***

En la societat actual, una de les principals problemàtiques és l'elevat impacte dels éssers humans en el medi natural. No només hi ha una sobreexplotació d'aquest medi, sinó que sovint es destrueixen zones d'alta importància ecològica. Les solucions naturals ofereixen una manera de revertir aquest procés de degradació. Aquestes solucions ens permeten obtenir beneficis de manera més sostenible del medi natural i, a més, la seva aplicació contribueix a la seva restauració. No obstant això, sovint són solucions poc conegudes i amb poca experiència en la seva aplicació. En altres paraules, les solucions naturals ens proporcionen alternatives que s'allunyen de la destrucció del medi natural, però és necessari millorar les recerques.

### ***REFLEXIÓ SOBRE PERSPECTIVA DE GÈNERE***

Des del seu començament, la perspectiva de gènere en el camp de la informàtica ha representat un important problema, majoritàriament degut a la manca de representació de les dones i la desigualtat de gènere. Aquesta manca de representació ha portat a l'atribució d'estereotips de gènere molt establerts en aquest àmbit. Això influeix en el fet que les dones ocupin rols tècnics menys importants, posant de manifest la manca de visibilitat i de canvi social.

En conclusió, la bretxa digital de gènere crea noves diferències professionals i laborals, agreujant la bretxa salarial i la bretxa de reconeixement professional. Això genera un aprofitament insuficient del sector informàtic per corregir les pròpies desigualtats causades pels rols reproductius (Vilardo, s.d.).

# 1. INTRODUCCIÓ

El 31 d'octubre del 2007, l'Institut de Drets Humans de Catalunya (IDHC) va reconèixer, a través de l'article 1, l'accés a aigua sanejada i potable com un dret fonamental per a tots els éssers humans (Institut de Drets Humans de Catalunya, s.d). Posteriorment, el 28 de juliol de 2010, l'Assemblea General de les Nacions Unides va reafirmar aquest dret universal mitjançant l'Agenda 2030, on l'Objectiu de Desenvolupament Sostenible (ODS) número 6 estipula l'accés universal a serveis d'abastament i sanejament adequats (Sauri i Ribas, 2022). Aquest moviment públic pretén abordar una de les principals manifestacions de la pobresa, ja que més de 2.600 milions de persones en tot el món no disposen de serveis bàsics de sanejament (Institut de Drets Humans de Catalunya, s.d). Aquesta desigualtat està més relacionada amb els nivells de desenvolupament i distribució de la riquesa que amb la disponibilitat d'aigua. Un exemple clar és que l'any 2017 gairebé 700 milions de persones no tenien cap mena d'accés a un mínim de serveis d'abastament i sanejament en països amb baixos ingressos (Sauri i Ribas, 2022).

Tot i voler avançar amb l'objectiu, encara hi ha una elevada desigualtat en la distribució d'aigua sanejada en tot el món. Les regions rurals desconnectades i zones de baixos ingressos són les més perjudicades. En aquest context, emergeixen diferents alternatives per abordar aquesta desigualtat, una de les alternatives més rellevants i destacades en un context sostenible com és l'agenda 2030 són les solucions basades en la natura (NBS).

El concepte de solució basada en la natura (NBS) ha aparegut recentment per designar aquelles tècniques inspirades en la natura que aborden diversos reptes socials tot preservant la sostenibilitat dels ecosistemes (Nikolakopoulou, 2022). Les NBS són solucions que es poden aplicar en el tractament d'aigua residual, oferint formes eficaces de tractar aigua residual sense utilitzar els processos convencionals com les depuradores. Aquestes tècniques es basen principalment en processos naturals i no requereixen fonts d'energia externa per al seu funcionament, excepte en casos específics on es necessiti l'ús de bombes o canonades i en el cas de tecnologies com els aigüamolls artificials amb airejament que presenten un cost energètic més elevat. Aquesta característica fa que el cost d'aquests mètodes de tractament d'aigües residuals sigui menor en la majoria dels casos que el dels mètodes convencionals, que consisteixen en diferents configuracions del procés de fangs actius (Gichamo et al., 2021). L'elevat cost d'inversió de les depuradores és un gran problema, especialment en municipis petits. En aquest cas la gran varietat de NBS pel tractament d'aigua residual i el baix cost que presenten, és una solució molt més factible que permet escollir una alternativa més personalitzada segons les condicions de l'aigua residual a tractar, la qualitat necessària i les variables ambientals (Ghaffar i Ei Saddi, 2007).

Les solucions basades en la natura són un concepte multidisciplinari i transversal que integra aspectes ambientals, socials i econòmics. Això implica que en l'etapa de planificació hi hagi una cooperació entre sectors que contribueix a un enfocament més holístic dels diferents reptes (Debele et al., 2023). Un sistema convencional no presenta aquesta cooperació, ja que en la seva planificació només es tenen en compte factors econòmics i factors relacionats amb la capacitat de tractament. Els NBS són un concepte que també presenta una major capacitat multifuncional, pel fet que una gestió correcta de les NBS pot oferir diversos beneficis alhora (Alves et al., 2024). Per exemple, aquestes solucions basades en la natura no només ofereixen beneficis directes pel que fa al sanejament de l'aigua, sinó que també influeixen, en la majoria dels casos, en la reconstrucció i manteniment d'ecosistemes i



zones naturals. El manteniment i la construcció de noves zones naturals, com llacs o basses, permeten la conservació d'ecosistemes i de la biodiversitat. A través de l'aplicació d'aquestes solucions, es millora la infraestructura i s'assegura un ús sostenible dels recursos hídrics, reduint la desigualtat i augmentant l'equitat dels recursos.

Per tal de fomentar la visibilitat i facilitar la implementació de les NBS, l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) està desenvolupant una eina per ajudar a la presa de decisions en la selecció de solucions basades en la natura per al tractament d'aigües residuals (Pueyo-Ros i Comas, 2024). Aquesta eina té com a principal objectiu seleccionar la millor solució de tractament natural d'aigua en funció de les necessitats de l'usuari. Permet als usuaris seleccionar la NBS més adequada segons les condicions específiques, tenint en compte factors econòmics, socials i les característiques de l'aigua residual a tractar. L'eina presenta una estructura ben definida, on:

- En primer lloc, l'usuari introdueix diferents dades de l'aigua a tractar i altres variables de context.
- Seguidament, l'eina selecciona totes les NBS que es poden aplicar segons els requisits de l'usuari.
- Posteriorment, l'usuari pot seleccionar una, diverses o totes les NBS suggerides per ser comparades mitjançant una anàlisi multicriteri.
- Llavors, l'usuari selecciona la tecnologia a partir d'un rànquing de tecnologies proporcionat per l'anàlisi multicriteri.
- En últim lloc, l'eina mostra diferents casos de mercat de la tecnologia seleccionada i diverses publicacions científiques d'interès. També proporciona informació sobre empreses de construcció de la tecnologia.

L'eina està en desenvolupament amb l'objectiu de facilitar i simplificar la instal·lació de NBS per al tractament d'aigua residual. Aquesta eina pot ser especialment beneficiosa, ja que permet als usuaris seleccionar i instal·lar la millor solució natural per a les seves condicions específiques. Aquesta iniciativa busca promoure la visibilitat i incentivar l'aplicació de més solucions naturals com una opció viable i eficaç per al tractament de l'aigua, ja que en algunes situacions pot ser més eficaç i més econòmica que un sistema convencional.

L'eina principalment realitza una selecció de les tecnologies possibles per després fer una anàlisi multicriteri. La part més important de l'anàlisi són la selecció dels criteris i indicadors, i l'obtenció de les mètriques per calcular-ne el seu valor, ja que l'anàlisi multicriteri (MCDA) és una metodologia utilitzada per avaluar i prendre decisions a través de múltiples criteris, considerant totes les opcions per obtenir el millor resultat. La selecció de criteris, d'indicadors i de les mètriques per quantificar-los en tecnologies NBS pel tractament d'aigües no està estudiat de forma sistemàtica, exhaustiva i integral.

## 2. OBJECTIVES

The main objective of this study is to create a reference framework for the multi-criteria analysis of NBS for water treatment and to show a practical example of the MCDA to help in the development of the assessment step of the NBS selection tool. In order to achieve this main objective, the following sub-objectives are considered:

- To develop different criteria and indicators to include economic, social and environmental concepts to carry out a multi-criteria analysis of the different nature-based solutions for wastewater treatment considered by the tool.
- To show the application of the multi-criteria analysis in different scenarios and to analyze the results, in order to observe different possible errors and effects in the weighting and ranking of the criteria.
- Finally, another specific objective developed in the study is to compare the different indicators developed to see possible relationships or similarities between them and to be able to indicate if there are any indicators that present similar proportions.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 ANÀLISI MULTICRITERI

L'anàlisi multicriteri és una metodologia que permet orientar la presa de decisions a partir de diversos criteris. Així doncs, és un mètode destinat essencialment a la comprensió i a la resolució de problemes de decisió (European Union, 2014). És un procediment avaluatiu condicional determinat per la fixació de diferents criteris comuns, els quals constitueixen una eina eficaç per la presa de decisió. Una característica important a destacar és que l'anàlisi multicriteri té en consideració diversos factors i actors implicats que deriven en una anàlisi molt més complex. Com a actors implicats es poden entendre el tècnic, el propietari i el beneficiari, però també es podrien incloure la població i el consumidor. L'objectiu principal és arribar a una solució mitjançant la simplificació del problema, tenint en compte en tot moment les preferències dels actors (European Union, 2014).

En els seus inicis, el mètode es va desenvolupar en l'àmbit de les ciències econòmiques i de l'enginyeria industrial. Durant la dècada de 1979, l'anàlisi multicriteri, conegut en aquella època com "ajuda multicriteri a la presa de decisions", va començar a experimentar un elevat desenvolupament fins a esdevenir una eina àmpliament utilitzada en el context científic. Avui en dia, proporciona una sèrie d'eines per a la resolució de problemes en la presa de decisions, explorant diversos punts de vista (European Union, 2014).

En general, l'anàlisi multicriteri ens ajuda a simplificar situacions complexes en la presa de decisions. Les bases sobre les quals es realitza la selecció dels criteris i la puntuació dels resultats sovint són senzilles, comprensibles i determinades pel grup que condueix l'anàlisi. A més, pot ser una eina de negociació útil en el sector econòmic, encara que s'ha de tenir en compte que presenta una sèrie de limitacions claus. Per exemple, és un mètode meta-matemàtic d'agregació de dades que requereix una qualificació adequada. També s'ha de considerar que l'anàlisi multicriteri pot ser considerat un mètode subjectiu en el moment de l'establiment dels criteris (European Union, 2014).

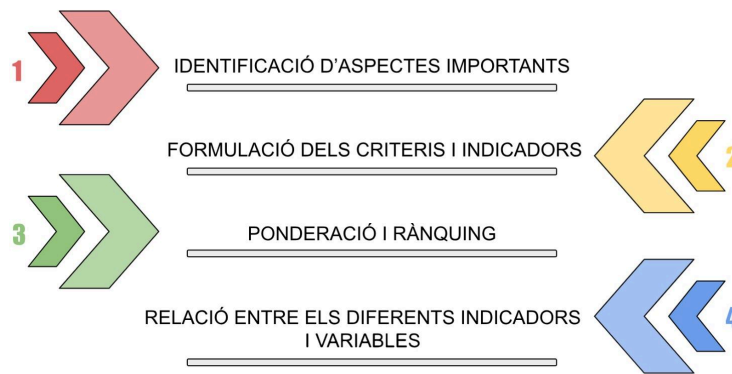
En el marc de l'anàlisi multicriteri, es distingeixen diversos tipus de metodologies. Entre aquestes es troben el Procés Analític Jeràrquic (AHP), la Teoria de la Utilitat dels Atributs Múltiples (MAUT), la Tècnica per Ordre de Preferència per Similitud amb la Solució Ideal (TOPSIS), l'Enfocament Aproximatiu Basat en la Dominància (DRSA), el Mètode d'Eliminació i Elecció que Expressa la Realitat (ELECTRE) i el Mètode d'organització del rànquing de preferències per a l'enriquiment de les avaluacions (PROMETHEE) (Masoud et al., 2022; Cinelli et al., 2014).

El mètode MAUT presenta diversos models multicriteri d'elecció, basats en conjunts alternatius d'axiomes que tenen implicacions per a la seva avaluació i ús (Figueira et al., 2005). El mètode AHP ofereix una mesura absoluta que s'aplica per classificar les alternatives en funció dels criteris o qualificacions o intensitats (Saaty, 1987). El mètode TOPSIS, bàsicament, es basa en la idea de plantejar la millor alternativa imaginada i després descobrir una situació real que estigui més a prop i més lluny d'aquesta alternativa. Aquest mètode només es pot aplicar amb dades numèriques (Uzun et al., 2021). El mètode DRSA es basa principalment en una taula d'informació, on les files es defineixen com a alternatives, mentre que les columnes presenten els criteris necessaris per avaluar les alternatives. És un mètode molt nou que utilitza la classificació per comparar les diferents alternatives (Cinell et al., 2014). Els mètodes ELECTRE formen una família de diversos mètodes, principalment de classificació (Roy, 1991). Cada mètode de la família presenta una fase d'agregació i explotació. En la fase d'agregació s'utilitzen conceptes de concordança per fer la compressió de parells d'alternatives (Govindan i Jepsen, 2016). Els mètodes PROMETHEE formen una família de diversos mètodes, i és un mètode que estableix funcions de presència de cada criteri per identificar la relació entre ells i les relacions dins dels diferents criteris (Brans i De Smet, 2016).

Les anàlisis multicriteri més utilitzades en la gestió ambiental són l'AHP i el MAUT, ja que totes dues presenten una elevada simplicitat, accessibilitat i facilitat d'ús. En canvi, l'anàlisi multicriteri més complex i menys utilitzat és el TOPSIS (Cegan et al., 2017; Uzun et al., 2021; Zhao et al., 2022). Els mètodes ELECTRE, PROMETHEE i DRSA obtenen millors resultats que els mètodes MAUT i AHP en l'aplicació d'un enfocament més sostenible i en la gestió dels límits. ELECTRE, PROMETHEE i DRSA limiten molt el grau de compensació entre criteris i àmbits de sostenibilitat, és a dir, tendeixen a utilitzar criteris molt específics prioritzant la consistència i la rellevància de cada criteri (Cinelli et al., 2014).

En aquest estudi, s'ha implementat un mètode més senzill basat en la mitjana ponderada, el qual és molt similar al mètode AHP. L'única diferència important entre els dos és que mentre el mètode AHP calcula els pesos per criteris de dos en dos, en aquest estudi es calculen tots alhora. Aquest enfocament simplificat implica l'ús de la mitjana ponderada tant en el càlcul dels diferents indicadors com en el càlcul de la mitjana global, amb l'objectiu d'obtenir el rànquing final de les alternatives. Cal destacar que la mitjana ponderada d'un conjunt de dades es calcula multiplicant cada nombre per un pes específic, sumant els resultats d'aquestes multiplicacions, i finalment dividint el resultat per la suma dels pesos assignats (Viquipèdia, s.d.). S'utilitza un mètode senzill i simple per evitar que l'ús d'aquesta eina digital sigui complex i difícil d'utilitzar, i d'aquesta manera s'aconsegueix que els usuaris puguin utilitzar millor l'eina.

L'aplicació de l'anàlisi multicriteri consta de 4 etapes principals descrites en la figura 1. En primer lloc, es realitza una identificació dels aspectes més importants, determinant l'àmbit d'aplicació i el marc lògic d'intervenció tenint en compte els actors. En la segona etapa, es realitza principalment la formulació dels diferents criteris i indicadors, començant per definir una jerarquia per a la presa de decisions entre alternatives. Seguidament, en la tercera etapa, s'estableix un sistema de ponderacions a escala de criteris i indicadors. En aquesta etapa també s'inclou l'aplicació de la mitjana ponderada i la creació del rànquing. Finalment, en l'etapa quatre, es realitza una anàlisi comparativa de diferents variables, fórmules i indicadors que s'utilitzen en l'estudi.



**Figura 1:** Passos aplicació d'anàlisi multicriteri.

### 3.1.1 ANÀLISI ESTADÍSTIC DE COMPARACIÓ DE VARIABLES I INDICADORS

L'última etapa de l'anàlisi multicriteri és realitzar una comparació dels diferents indicadors desenvolupats en l'estudi; aquesta es realitza mitjançant una matriu de correlació. És important tenir en compte que en el treball es tracten 35 solucions naturals pel tractament d'aigua residual, i algunes d'aquestes solucions són combinacions de diferents solucions individuals. En l'estudi es consideren 7 combinacions de tecnologies, les quals són resultat de combinar les següents tecnologies individuals: aiguamolls de tractament (TW), flux vertical (VF), flux horitzontal (HF), llac facultatiu (FP), llac anaeròbic (AP) i aiguamolls de superfície lliure (FWS).

Per tal de millorar la complexitat de l'anàlisi, en el cas dels indicadors de capacitat de tractament i de resiliència a l'escalfament global, no només s'utilitzen les dades de les zones temperades, sinó que en els dos casos s'inclouen tres indicadors addicionals per a les zones àrides, continentals i tropicals. L'objectiu principal és observar si hi ha alguna similitud entre els indicadors. En el cas que el coeficient de correlació sigui molt elevat, es podrien considerar que presenten proporcions similars i es podria eliminar un dels dos indicadors de l'estudi, per evitar repetició de dades.

En aquesta etapa, també es realitza una anàlisi de comparació de diverses fórmules d'indicadors i els efectes de la transformació logarítmica.

### 3.2 VIES DE RECERCA D'INFORMACIÓ

Per a la definició de l'anàlisi multicriteri i per al desenvolupament dels criteris que s'utilitzaran en l'estudi, es va realitzar una recerca bibliogràfica. Un dels primers passos en la recerca d'informació és la selecció de paraules clau. Principalment, es van determinar 13 paraules clau.

- a. Multi-criteria analysis    b. Wetlands effectiveness    c. Wetlands prioritization
- d. Decision-making    e. Risk management    f. Risk factors    g. Wetland quality
- h. Treatment wetlands    i. Waste stabilisation ponds    j. Green roofs
- k. Green walls    l. Willow systems    m. Hydroponics/aquaponics

Les quatre primeres paraules clau se centren a identificar articles que utilitzin sistemes jeràrquics i de prioritització, amb l'objectiu de trobar articles que expliquin l'estructura i el funcionament d'una anàlisi

multicriteri. Les paraules claus "e" i "f" es fan servir per trobar estudis amb criteris relacionats amb dos riscos específics i amb altres factors relacionats. Les altres paraules clau són exemples de tractaments naturals per identificar articles que realitzin anàlisis multicriteri amb aquest tipus de solucions naturals.

Principalment, es van utilitzar dues bases de dades de literatura acadèmica: Scopus i Google Acadèmic. Les primeres recerques es van enfocar principalment a la base de dades Scopus per trobar treballs que realitzin una anàlisi multicriteri i que tinguin en compte algun tipus de solució natural. La majoria d'aquests articles comparaven les alternatives per buscar la localització ideal o funció idònia. L'objectiu principal d'aquesta recerca és trobar estudis que realitzessin una anàlisi multicriteri per comparar instal·lacions en unes condicions determinades. La suma d'aquests estudis revisats no respon a tots els objectius de la recerca.

Després d'aquesta primera recerca, es va iniciar una nova recerca dividida en dues parts: la primera, per trobar articles d'anàlisi multicriteri en tecnologies convencionals; i la segona, per determinar la millor opció d'instal·lació d'una solució natural. En aquesta nova recerca es van utilitzar les dues bases de dades de literatura acadèmica (Scopus i Google Acadèmic). La idea principal era cercar per determinar l'estructura i les diferents fases de les anàlisis multicriteri i els diferents tipus d'anàlisi que es poden aplicar. A més, es van buscar articles d'anàlisi multicriteri en solucions naturals de tractament d'aigua residual per veure diferents exemples de criteris i indicadors aplicats.

### 3.3 RECOPIACIÓ I TRACTAMENT DE DADES

En aquest estudi s'utilitza una taula de dades d'elaboració pròpia per determinar 6 variables. Aquesta base de dades recull sis variables utilitzades en l'estudi, resultat de la recerca bibliogràfica de diferents articles, casos d'estudi i models matemàtics.

A banda de les dades obtingudes en la recerca bibliogràfica realitzada durant aquest estudi, bona part de les dades utilitzades en aquest TFG provenen d'una base de dades anomenada NAT4WAT (ICRA, 2024a), que va ser desenvolupada per l'ICRA per crear un sistema d'ajuda a la decisió per seleccionar solucions basades en la natura per al tractament d'aigües residuals. Aquest desenvolupament està recollit en l'article Acuña et al. (2023). És important tenir en compte que en aquest estudi les variables d'eficiència d'eliminació recollides en la base de dades NAT4WAT es transformen en tant per 1. D'aquesta base de dades també s'extreu una taula de dades provinents de revistes científiques d'estudis d'implementació real; d'on s'obtenen 2 variables. A continuació, es mostren la recopilació de les dades de revistes científiques de la base de dades NAT4WAT i l'obtenció de dades de la taula desenvolupada per l'estudi.

#### **i. Recopilació de les dades de revistes científiques de la base de dades NAT4WAT**

Les variables de revistes científiques es recullen en una taula, la qual ha estat proporcionada per l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA, 2024b). Específicament, s'han agafat dades de les dues variables, concentracions de sortida de fosfats i nitrats de 25 NBS (*aerated treatment wetland, anaerobic + facultative pond, anaerobic + maturation pond, anaerobic pond, aquaponic system, facultative + maturation pond, facultative pond, free water surface treatment wetland, french vertical flow treatment wetland, horizontal flow green wall, horizontal flow treatment wetland, hydroponic system, in-stream restoration, maturation pond, natural wetland, rapid-rate soil infiltration system, reciprocating treatment wetland, rooftop treatment wetland, slow-rate soil infiltration system, surface*

*aerated pond, treatment wetland for CSO, vertical flow + horizontal flow treatment wetland, vertical flow green wall, vertical flow treatment wetland, willow system*). En el cas de les tecnologies que no es disposen de dades, s'agafen els límits legals de petites depuradores. La Directiva de la Unió Europea sobre aigües residuals (Directiva 91/271/CEE) indica que el límit legal de fòsfor total és de 2 mg per litre i el de nitrogen total és de 15 mg per litre. En el cas dels nitrats, se suposa que tot el nitrogen que surt de la tecnologia és nitrat, és a dir, se suposa que principalment entra amoni i aquest es nitrifica completament ha nitrat. També es considera que es desnitrifica una part que surt en forma de nitrogen gas. Per tant, es contempla un valor de 15 mg/l de nitrat en la sortida, com un valor conservador.

## **ii. Recopilació de dades desenvolupades per aquest estudi**

La taula desenvolupada per aquest estudi recull dades numèriques de les variables taxa de càrrega hidràulica, la superfície, les persones equivalents subministrades, el cost de construcció, el cost d'operació, la compatibilitat / capacitat d'afegir nous fluxos i el temps de vida operativa. Aquestes variables s'obtenen per vies diferents i en alguns casos específics les dades d'una mateixa variable també s'obtenen de manera diferent. Les dades es troben recopilades en una taula desenvolupada per l'estudi (Ferrer, 2024e). El procés d'obtenció de cada variable es descriu a continuació:

### ***Recopilació de dades de cost, de superfície, de persones equivalent subministrades i de la taxa de càrrega hidràulica***

En les tecnologies *aerated treatment wetland, anaerobic pond, in-stream restoration, natural wetland, reciprocating treatment wetland, rooftop treatment wetland, slow-rate soil infiltration system, treatment wetland for CSO, willow system, free water surface treatment wetland, french vertical flow treatment wetland, horizontal flow treatment wetland i vertical flow treatment wetland*, les dades s'obtenen de l'informe (Cross et al., 2022) de diferents casos d'estudi. En el cas específic de les últimes 4 tecnologies mencionades anteriorment, s'agafen dades de més d'un cas d'estudi. Per aconseguir una dada mitjana de les diferents variables s'utilitza la mitjana quadràtica. Aquesta mitjana fa servir l'arrel quadrada de la mitjana aritmètica dels quadrats dels valors d'una variable (Viquipèdia, s.d.). La mitjana quadràtica sobreestima en comparació amb una mitjana aritmètica (Wikipedia, s.d.). Això fa que sigui una mitjana més conservadora, proporcionant valors més elevats. En el cas de les variables com el cost i la superfície, la utilització d'una mitjana que sobreestimi fa que els valors obtinguts siguin més conservadors i realistes. En el cas de la població equivalent subministrada i la taxa de càrrega hidràulica, l'aplicació d'una mitjana quadràtica no seria necessària, però com que només s'aplica en quatre tecnologies, es manté. En el cas fictici que s'apliqués a més tecnologies, seria recomanable utilitzar la mitjana aritmètica.

En cas d'altres tecnologies com el *aquaponic system, facultative pond, horizontal flow green wall, hybrid living wall, hydroponic system, maturation pond, phytoparking, rain garden with treatment, rapid-rate soil infiltration system, reactive media in treatment wetland, rhizosph'air aerated french wetland, surface aerated pond, vertical flow green wall i vertical flow wetland with recycle and partial saturation*, les dades s'obtenen de fonts bibliogràfiques d'articles, de models matemàtics i de casos d'estudi. Els enllaços dels diferents articles d'on s'obtenen les dades i d'algunes estimacions es recullen en el document (Ferrer, 2024a.).

En el cas de les tecnologies combinades com *aerated + free water surface wetland, anaerobic + facultative pond, anaerobic + maturation pond, facultative + maturation pond, facultative pond +*

*free water surface flow constructed wetland, horizontal flow treatment wetland + maturation pond i vertical flow + horizontal flow treatment wetland*, es realitza una mitjana ponderada de cada variable, tenint en compte les dues dades de les tecnologies individuals de cada combinació. S'apliquen mitjanes ponderades suposant que variables com la superfície i el cost poden variar en la combinació i experimentar canvis, amb una reducció del cost i de la superfície respecte a la tecnologia individual gràcies a l'optimització de l'espai i de l'estructura. En el cas de les variables *taxa de carrega hidràulica* i població equivalent subministrada, optar per una mitjana ponderada en lloc del valor mínim representa una opció més realista i conservadora.

És important mencionar que les dades de l'informe (Cross et al., 2022) ja presenten la conversió de persones equivalents. En el cas de les dades bibliogràfiques, s'ha detectat que l'única tecnologia que presenta la conversió de persones equivalents és el *rhizosph'air aerated french wetland*. Pel que fa a les tecnologies *facultative pond, maturation pond, phytoparking, rapid-rate soil infiltration system, reactive media in treatment wetland i vertical flow wetland with recycle and partial saturation*, es transforma la variable de persones subministrades en persones equivalents multiplicant pel valor de conversió indicat a la taula 1, que varia segons la tipologia d'aigua residual. En totes les tecnologies excepte la tecnologia *hybrid living wall*, es multiplica pel coeficient d'1, ja que es considera que tracten aigües residuals domèstiques brutes. Pel que fa a la tecnologia *hybrid living wall*, es considera que tracta aigües grises i es multiplica pel coeficient de 0,33.

**Taula 1:** Tipus d'aigua acceptats com a entrada i estimació de persones equivalents (Pueyo-Ros, s.d.).

Escenari de tractament d'aigua		Aigües residuals domèstiques pretractades	0,80
Qualsevol aigua residual	1,00	Aigües residuals diluïdes del riu	0,05
Aigües residuals domèstiques brutes	1,00	Aigües residuals de càmping	0,80
Aigües grises	0,33	Aigües residuals d'oficines	0,50
Aigües residuals depurades secundàries	0,05	Aigua de descàrrega de CSO	0,50

En el cas específic de les tecnologies *aquaponic system, horizontal flow green wall, hydroponic system, in-stream restoration, rain garden with treatment, surface aerated pond i vertical flow green wall*, no s'han pogut obtenir dades de la població equivalent. Per solucionar aquest problema, s'ha realitzat una equació de la recta entre les variables superfície i població equivalent, tenint en compte només les tecnologies individuals. Amb la següent equació de la recta, s'ha estimat el valor de població equivalent amb les dades de superfície, on la x representa la superfície i la y la població equivalent:

$$y = 0,00103 x + 33876 \quad (\text{eq. 26})$$

### **Recopilació de dades de compatibilitat / capacitat d'afegir nous fluxos**

En el cas de la variable de capacitat per afegir nous fluxos en el procés, les dades s'obtenen de dues vies diferents. En la majoria de les tecnologies, les dades provenen de l'informe (Cross et al., 2022), específicament de l'apartat de compatibilitat amb altres Solucions Basades en la Natura (NBS). Pel que fa a les tecnologies *rain garden with treatment* i al *vertical flow wetland with recycle and partial saturation*, les dades s'obtenen a partir de fonts bibliogràfiques, recopilades en el següent document. (Ferrer, 2024b). Per quantificar la variable, es realitza una escala numèrica amb el nombre de compatibilitats que menciona l'informe (Cross et al., 2022) i en els articles bibliogràfics. Aquesta escala pren valors de 0 a infinit, però el valor màxim identificat ha sigut 4 compatibilitats per tecnologia. En el cas de les tecnologies combinades, s'agafa el valor mínim de la tecnologia

individual, ja que es considera que l'acompliment de noves tecnologies serà més complex que en el cas d'una tecnologia individual.

### ***Recopilació de dades del temps de vida operativa***

En últim lloc, la variable del temps de vida operativa s'obté a partir de recerques bibliogràfiques. En el cas de les tecnologies *natural wetland*, *in-stream restoration* i *willow system*, es considera que el temps de vida operativa és el valor màxim. En aquest document, es proporcionen els diferents enllaços d'on s'han extret les dades (Ferrer, 2024c).

## **4. RESULTATS**

A continuació es presenten els resultats per cadascun dels passos d'una anàlisi multicriteri.

### **4.1 IDENTIFICACIÓ D'ASPECTES IMPORTANTS**

La identificació de l'àmbit d'aplicació i la detallada descripció del context són etapes essencials en l'aplicació d'una anàlisi multicriteri, ja que l'establiment del marc d'acció té una influència significativa en la formulació dels criteris i indicadors de l'estudi. Durant aquesta etapa, és crucial tenir en compte els diferents factors i aspectes que influeixen en l'estudi per a poder formular uns criteris i indicadors més complexos i detallats, amb l'objectiu d'aconseguir la solució o alternativa més idònia.

Els principals actors implicats en l'estudi són els usuaris de l'eina i principalment es considera que són ajuntaments o altres organismes municipals o locals. Tenint en compte que és una solució natural, s'han de tenir presents altres actors implicats com la població i els propietaris de terres.

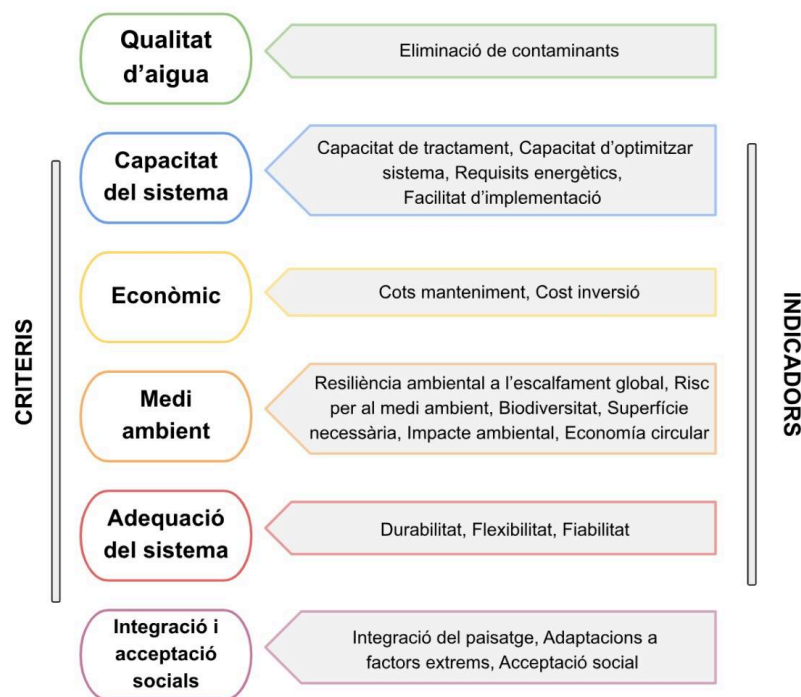
En la identificació dels diferents indicadors i criteris, és important tenir present que els criteris s'apliquen en una anàlisi multicriteri com un sistema de mesura i que els indicadors són assignacions de valors que indiquen el compliment dels criteris (Pavlovskaja, 2014). Com es tracta de solucions naturals, s'intenta que l'anàlisi estigui enfocada en un àmbit més sostenible, tenint en compte les condicions econòmiques, socials i ambientals en l'elaboració dels criteris i indicadors. No només s'han de tenir present factors relacionats amb la qualitat i la quantitat d'aigua residual tractada, sinó també altres factors com la vida útil, l'eutrofització o els serveis ecosistèmics. En un sentit més relatiu, quan es parla de criteris sostenibles, no només són criteris basats en factors actuals, sinó que tenen en compte impactes a llarg termini i factors futurs.

Els diferents criteris i indicadors constitueixen una eina jeràrquica per a la presa de decisions. Per aquesta raó, és d'elevada importància determinar els indicadors de manera personalitzada segons el context. Un cop s'han determinat els factors i els actors implicats en l'estudi, s'elaboren els criteris i indicadors. S'utilitzen les vies de recerca d'informació per buscar exemples de criteris i indicadors, on principalment s'han tingut en compte els següents articles (Ghaffar i Ei Saddi, 2007; Kalbar et al., 2012; Yahya et al., 2020; Alamanos, 2021; Ruangpan et al., 2021).

Després de la recerca, es consideren 6 criteris i 19 indicadors (veure figura 2). Els criteris es basen en 6 aspectes clau per seleccionar una solució de tractament d'aigua residual basada en la natura. Això inclou no només la qualitat de l'aigua i la capacitat del sistema, sinó també aspectes econòmics, socials, ambientals i de l'adequació del sistema.



El **criteri de qualitat de l'aigua** té en compte les característiques de l'aigua residual i la capacitat del sistema per eliminar els contaminants. L'indicador considerat en aquest criteri és la capacitat d'eliminació de contaminants. El **criteri de capacitat del sistema** no només considera la seva capacitat de tractament de l'aigua, sinó també altres factors com la implantació i les necessitats energètiques. Els indicadors considerats en aquest criteri són la capacitat de tractament, la capacitat d'optimitzar el sistema, els requisits energètics i la facilitat d'implementació. Pel que fa al **criteri econòmic**, s'analitzen els costos inicials del projecte i els costos d'operació, tenint en compte tots els costos econòmics que implica la implementació de cada solució. Els indicadors considerats en aquest criteri són el cost de construcció i el cost d'operació. El **criteri mediambiental** aborda els efectes de les solucions en el medi ambient, incloent-hi aspectes com l'espai i la contaminació. Els indicadors considerats en aquest criteri són la resiliència ambiental a l'escalfament global, el risc per al medi ambient, la biodiversitat, la superfície necessària, l'impacte ambiental i l'economia circular. Pel que fa al **criteri d'adequació del sistema**, s'avaluen aspectes com la vida útil i la capacitat d'adaptació a diferents situacions. Els indicadors considerats en aquest criteri són la durabilitat, la flexibilitat i la fiabilitat. Finalment, el **criteri d'integració i acceptació social** té en compte l'efecte de les diferents solucions en la societat i la seva acceptació social. Els indicadors considerats en aquest criteri són la integració del paisatge, les adaptacions a factors extrems i l'acceptació social.



**Figura 2:** Criteris i indicadors per avaluar les tecnologies de tractament d'aigua.

## 4.2 FORMULACIÓ DELS INDICADORS

Una vegada determinat el context de l'estudi i els actors implicats, i s'han elaborat els diferents criteris i indicadors, es descriuen les fórmules dels indicadors utilitzats en l'estudi. En aquest punt s'especifiquen les diferents mesures dels indicadors de cada criteri. En tots els casos, s'utilitzen fórmules quantitatives, i en alguns indicadors específics s'utilitza una escala de valors per quantificar variables qualitatives. Totes les fórmules desenvolupades per l'estudi estan normalitzades amb valors entre 0 i 1, on un valor d'1 indica el millor resultat possible per la tecnologia escollida.

## 1. Qualitat d'aigua

### a. Eliminació de contaminants

En el context del tractament d'aigua, l'eliminació dels components de l'aigua residual es basa en l'eliminació de contaminants que poden causar perjudicis a la salut humana, la qualitat de les aigües i l'estat dels ecosistemes (Balaguer et al., 2007). Principalment, aquest indicador fa referència a l'eliminació de substàncies contaminants de l'aigua per part de cada tecnologia, que té com a objectiu reduir les concentracions a valors inferiors als màxims recomanats per a l'ús a què estigui destinada l'aigua (Termcat, s.d).

$$\text{Eliminació de contaminants} = \frac{rDQO + rDBO + rNT + rPT + r\text{Microbiològic}}{5} \quad (\text{eq. 1})$$

L'**eliminació de contaminants** ( $\in [0,1]$ ), on valors d'1 indiquen que la tecnologia presenta una elevada eficiència en l'eliminació de contaminants. **rDQO** és la capacitat de la tecnologia per reduir la demanda química d'oxigen ( $\in [0,1]$ ). **rDBO** és la capacitat de la tecnologia per reduir la demanda biològica d'oxigen ( $\in [0,1]$ ). **rNT** és la capacitat de la tecnologia per eliminar el nitrogen total ( $\in [0,1]$ ). **rPT** és la capacitat de la tecnologia per eliminar el fòsfor total ( $\in [0,1]$ ). **rMicrobiològic** és la capacitat de la tecnologia per reduir organismes microscòpics ( $\in [0,1]$ ).

## 2. Capacitat del sistema

### a. Capacitat de tractament d'aigua

Aquest indicador se centra en la quantitat d'aigua que pot tractar cada tecnologia. És un concepte molt enfocat al rendiment, per distingir les tecnologies amb elevada capacitat de tractament. Per determinar la capacitat de la tecnologia s'ha de tenir en compte la taxa de càrrega hidràulica, que fa referència al volum d'aigua que pot ser tractat, així com la taxa de càrrega orgànica, que és la quantitat de matèria orgànica que pot ser tractada. L'indicador ens permet diferenciar les diferents tecnologies segons la capacitat tractament.

$$\text{Capacitat de tractament} = \frac{\frac{HLR}{MaxHLR} + \frac{OLR}{MaxOLR}}{2} \quad (\text{eq. 2})$$

La **capacitat de tractament** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 indiquen una alta capacitat de tractament. **HLR** és la taxa de càrrega hidràulica ( $\in [0,\infty)$ ). **Max HLR** és el valor màxim de la taxa de càrrega hidràulica entre totes les tecnologies comparades. **OLR** és la taxa de càrrega orgànica ( $\in [0,\infty)$ ). **Max OLR** és el valor màxim de la taxa de càrrega orgànica entre totes les tecnologies comparades. La variable de taxa de càrrega orgànica varia segons la localització, és a dir, les dades utilitzades en l'estudi difereixen entre zones tropicals, àrides, continentals i temperades. En aquest indicador només es fan servir dades de localitzacions temperades. En el cas que l'usuari indiqui una altra localització, es farien servir les dades pertinents.

### b. Capacitat d'optimitzar el sistema

Aquest indicador avalua quines tecnologies presenten la capacitat més gran per assolir l'eliminació òptima de contaminants. Algunes tecnologies ja presenten una elevada eficiència per si soles, mentre que altres destaquen per la seva capacitat d'integrar-se a altres sistemes i, d'aquesta manera, millorar l'eliminació de contaminants. A diferència de l'indicador d'eliminació de contaminants, aquest també

avalua la capacitat global del sistema i no només del tractament. Per aquesta raó, s'inclou el criteri de capacitat del sistema.

$$\text{Capacitat d'optimitzar sistema} = \frac{\frac{CAM}{Max\ CAM} + \text{Eliminació de contaminants}}{2} \quad (\text{eq. 3})$$

**La capacitat d'optimitzar el sistema** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 indiquen que la tecnologia presenta una elevada eficiència i una elevada capacitat d'afegir fluxos. En altres paraules, valors propers a 1 presenten una elevada capacitat d'optimització del sistema. L'eliminació de contaminants és un indicador calculat anteriorment ( $\in [0,1]$ ). **CAM** és la capacitat d'afegir elements o mòduls en el sistema ( $\in [0,\infty)$ ). **Max CAM** és el valor màxim entre totes les tecnologies comparades.

### c. Facilitat d'implementació

L'indicador de facilitat d'implantació inclou tots aquells factors decisius en la implantació d'una tecnologia. Aquests factors inclouen el risc biològic, la demanda de mà d'obra i la necessitat de tecnologies més complexes que requereixin un major nivell d'habilitat. En aquest estudi, no es disposa de les variables directes dels diferents factors, sinó de variables relacionades amb les inversions que suposa cada factor.

$$\text{Facilitat d'implementació} = 1 - \frac{\frac{IObra}{3} + \frac{IHabilitat}{3} + \frac{IRbiològic}{3}}{3} \quad (\text{eq. 4})$$

**La facilitat d'implementació** ( $\in [0,1]$ ) indica que valors propers a 1 representen una elevada facilitat per instal·lar la tecnologia, la qual cosa implica una baixa inversió en els diferents factors. **IObra** és la inversió en mà d'obra ( $\in [0,3]$ ). **IHabilitat** és la inversió segons habilitat ( $\in [0,3]$ ). **IRbiologic** és la inversió relacionada amb el risc biològic ( $\in [0,3]$ ). Aquest risc biològic fa referència al possible risc d'infecció que presenta cada tecnologia sobre les persones.

### d. Requisits energètics

L'indicador de requisits energètics se centra en les necessitats i requisits energètics de les diferents tecnologies. Aquesta fórmula està enfocada a la utilització de dades reals de consum energètic, però per la falta de dades només es disposa d'una variable de necessitats energètiques ( $\in [0,1]$ ), que només indica si presenta necessitat d'energia.

$$\text{Requisits energètics} = 1 - \frac{Ne}{Max\ Ne} \quad (\text{eq. 5})$$

**Requisits energètics** ( $\in [0,1]$ ), on un valor d'1 indica que la tecnologia presenta una baixa o nul·la necessitat energètica. **Ne** són les necessitats energètiques ( $\in [0,\infty)$ ). **Max Ne** és el valor màxim de les necessitats energètiques de totes les tecnologies comparades.

## 3. Econòmic

### a. Cots de manteniment

L'indicador de cost de manteniment té en compte tots els costos que suposa la tecnologia al llarg de l'any. En l'estudi es planteja una fórmula fictícia amb totes les variables que s'han de considerar en el càlcul del cost de manteniment. Cal tenir en compte que el cost de l'electricitat pot variar segons el

moment i el lloc on es faci el càlcul; per a poder fer el càlcul, s'agafen valors mitjans anuals del cost de l'electricitat.

$$\text{Cost de manteniment} = 1 - \left( \frac{\text{Cost salari treballador} + \text{Cost material i productes químics} + \text{Altres despeses relacionades amb el manteniment} + \text{Cost d'electricitat} + \text{Despeses de reparacions, renovacions i recanvis}}{\text{Cost estàndard de manteniment}} \right) \quad (\text{eq.6})$$

En aquest estudi, no s'aplica la fórmula anterior, ja que es disposa de les dades del cost de manteniment. S'aplica directament la variable del cost de manteniment per persona equivalent any (€/PE x any).

$$\text{Cost de manteniment} = 1 - \frac{\log(\text{Cmp}) - \text{Mínim log}(\text{Cmp})}{\text{Màxim log}(\text{Cmp}) - \text{Mínim log}(\text{Cmp})} \quad (\text{eq.7})$$

**El cost de manteniment** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 indiquen que el cost de manteniment de la tecnologia és molt baix. **Log(Cmp)** és l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable del cost de manteniment per persona equivalent any ( $\in [0,\infty)$ ). **Mínim log(Cmp)** és el valor mínim de l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable del cost de manteniment per persona equivalent any. **Màxim log(Cmp)** és el valor màxim de l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable del cost de manteniment per persona equivalent any.

#### b. Cost d'inversió

L'indicador de cost d'inversió té en compte tots els costos d'inversió associats a la construcció de cada tecnologia. En l'estudi es planteja una fórmula teòrica que inclou totes les variables necessàries per calcular aquest cost. Aquesta fórmula considera un cost per càpita, el qual inclou el cost dels materials i productes químics, el cost de construcció i el model de negoci.

$$\text{Cost de Construcció} = 1 - \left( \frac{\text{Cost capital} + \text{Oportunitat d'operació} - \text{Durabilitat}}{\text{Cost mínim de construcció}} \right) \quad (\text{eq.8})$$

En aquest estudi, no s'aplica la fórmula esmentada anteriorment, ja que es disposa de les dades del cost de construcció/inversió. S'utilitza directament la variable del cost de construcció per persona equivalent (€/PE).

$$\text{Cost de construcció} = 1 - \frac{\log(\text{CCp}) - \text{Mínim log}(\text{CCp})}{\text{Màxim log}(\text{CCp}) - \text{Mínim log}(\text{CCp})} \quad (\text{eq.9})$$

**El cost de construcció** ( $\in [0,1]$ ), amb valors propers a 1, indica que el cost d'inversió de la tecnologia és molt baix. **Log(CCp)** és l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable del cost de construcció per persona equivalent ( $\in [0,\infty)$ ). **Mínim log(CCp)** és el valor mínim de l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable del cost de construcció per persona equivalent. **Màxim log(CCp)** és el valor màxim de l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable del cost de construcció per persona equivalent.

#### 4. Medi ambient

### a. Resiliència ambiental a l'escalfament global

L'indicador de resiliència ambiental és la capacitat d'un sistema natural per absorbir els efectes dels canvis, és a dir, és la capacitat de reaccionar als canvis sense modificar la seva configuració o funcionament (Enel, 2023). L'indicador se centra en els efectes derivats de l'escalfament global, principalment causat per l'alliberament dels gasos d'efecte hivernacle, els quals provoquen alteracions en la temperatura del planeta (Mans Unides, s.d).

$$\text{Resiliència ambiental} = \frac{OLR}{OLR_{tropical}} \quad (\text{eq. 10})$$

**La resiliència ambiental** ( $\in [0,1]$ ), on els valors són propers a 1, indica que la tecnologia té una elevada capacitat d'adaptar-se a diferents canvis ambientals provocats per l'escalfament global. **OLR** és la taxa de càrrega orgànica ( $\in [0,\infty)$ ). La variable taxa de càrrega orgànica varia segons la localització, és a dir, les dades utilitzades en l'estudi difereixen entre zones tropicals, àrides, continentals i temperades. En la variable OLR es fan servir dades de localitzacions temperades. **OLR tropical** són els valors de referència de la taxa de càrrega orgànica en zones tropicals ( $\in [0,\infty)$ ). S'utilitza com a valor de referència, ja que en les zones tropicals els canvis de temperatura són menors a causa de la major humitat deguda a l'evapotranspiració (Ruiz Elvira, s.d.) i es mantenen a temperatures elevades al llarg de l'any. Es realitza la comparació amb la variable taxa de càrrega orgànica, ja que ens indica si hi ha canvis en el funcionament i en la capacitat del sistema. En situacions de temperatura elevada, si la tecnologia analitzada presenta aquesta adaptabilitat o resiliència, hauria d'augmentar els processos de biodegradació i, per tant, augmentar la taxa de càrrega orgànica que pot tractar (Wijekoon et al., 2011). Això resultaria en valors similars als de clima tropical.

### b. Risc per al medi ambient

L'indicador de risc per al medi ambient intenta reflectir el risc potencial que suposa eliminar parcialment els contaminants de les diferents tecnologies. Principalment, l'indicador té en compte l'eliminació de diferents contaminants com el nitrogen total, el fòsfor total, la demanda química d'oxigen i el risc que suposen els diferents contaminants en el medi ambient.

$$RSM = \frac{\frac{rNT \times 4}{7} + \frac{rPT \times 4}{7} + \frac{rDQO \times 2}{7} + \frac{rMicrobiològic \times 1}{7}}{4} \quad (\text{eq. 11})$$

**RSM** és l'indicador de risc per al medi ambient ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 ens indiquen que el risc de la tecnologia pel medi ambient és molt baix. El RSM està relacionat amb la capacitat d'eliminació i el risc de cada contaminant. És important tenir en compte el risc que suposa la seva alliberació, ja que gairebé mai s'eliminen el 100% dels contaminants. En una escala de prioritització, una tecnologia amb valors propers a 1 indica que presenta elevades eliminacions dels contaminants, evitant la seva alliberació i, per tant, el risc que suposen pel medi ambient. **rDQO** és la capacitat de la tecnologia per reduir la demanda química d'oxigen ( $\in [0,1]$ ). **rNT** és la capacitat de la tecnologia per eliminar el nitrogen total ( $\in [0,1]$ ). **rPT** és la capacitat de la tecnologia per eliminar el fòsfor total ( $\in [0,1]$ ). **rMicrobiològic** és la capacitat de la tecnologia per reduir els organismes microscòpics ( $\in [0,1]$ ). Cada eficiència d'eliminació es multiplica pel risc del contaminant (RCM), on s'ha creat un rang de valors per establir un nivell de risc ( $\in [1,7]$ ). Valors de 7 corresponen a contaminants que presenten un baix perill pel medi ambient. RCM (1. Patògens, 2. Productes Químics Orgànics, 3.

Metalls Pesants, 4. Nutrients, 5. Sòlids en Suspensió, 6. Substàncies Orgàniques Dissoltes, 7. Gasos Dissolts). Aquesta classificació és realitzada segons les dades del Reial decret 3/2023, de 10 de gener, on s'estableixen els criteris tècnics-sanitaris de qualitat de l'aigua de consum, control i subministrament.

### c. Biodiversitat

S'ha de tenir en compte que la biodiversitat és fonamental per al manteniment de la qualitat i quantitat dels subministraments d'aigua i juga un paper essencial (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2013). Una biodiversitat adequada, en molts casos, ajuda a reduir els contaminants com el fòsfor i el nitrogen, però també genera una millora de la qualitat biològica (Retema, s.d). En l'estudi, es va plantejar que la fórmula utilitzada per quantificar l'índex de biodiversitat podia ser l'Índex de Simpson (D). Aquest es podia aplicar individualment per quantificar la biodiversitat de fauna, flora i pol·linitzadors o per avaluar la biodiversitat global.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^s ni \times (ni - 1)}{N(N-1)} \quad (eq. 12)$$

Aquest índex es podria utilitzar si es disposés de dades d'altres localitzacions similars i de dades més específiques sobre l'abundància i la riquesa de les espècies de fauna, flora i pol·linitzadors. En aquest estudi, ja es disposa de dades qualitatives de biodiversitat i s'aplica directament l'eq.13.

$$Biodiversitat\ Total = \frac{\frac{BFa}{3} + \frac{BFL}{3} + \frac{BP}{3}}{3} \quad (eq. 13)$$

**La biodiversitat total** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 indiquen una elevada biodiversitat global. **BFa** és la biodiversitat de fauna ( $\in [0,3]$ ). **BFL** és la biodiversitat de flora ( $\in [0,3]$ ). **BP** és la biodiversitat de pol·linitzadors ( $\in [0,3]$ ).

### d. Superfície necessària

És necessari considerar la superfície necessària com un indicador per conèixer els requisits d'espai que comporta cada tecnologia. Com es disposa d'informació sobre la superfície de cada tecnologia, es farà servir la superfície mitjana estimada en metres quadrats per persones equivalent.

$$Superfície\ necessària = 1 - \frac{\log(Si) - \text{mínim } \log(Si)}{\text{màxim } \log(Si) - \text{mínim } \log(Si)} \quad (eq. 14)$$

**Superfície necessària** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 ens indicaran que la tecnologia requereix una baixa superfície necessària. **Log(Si)** és l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable de la superfície necessària ( $\in [0,\infty)$ ). **Mínim log(Si)** és el valor mínim de l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable de la superfície necessària. **Màxim log(Si)** és el valor màxim de l'aplicació del logaritme en base 10 de la variable de la superfície necessària.

### e. Impacte ambiental

L'impacte ambiental fa referència a tots els factors que poden tenir un efecte sobre el medi ambient. Normalment, els impactes ambientals tenen una presència negativa, com ara l'amoni o els nitrats. L'impacte ambiental és una eina fonamental per quantificar l'efecte, a diferència de l'indicador de risc per al medi ambient, que només quantifica el risc. L'eficiència d'eliminació d'amoni s'ha tingut en compte en la fórmula EI, ja que, si no s'elimina, pot tenir un efecte tòxic en el medi aquàtic independent de l'efecte de l'eutrofització.

$$EI = \frac{(1-Ne) + rNH4 + (1 - \frac{IRbiològic}{3}) + (1 - \frac{Epi}{Epi\text{ màx}})}{4} \quad (eq. 15)$$

EI és l'impacte ambiental ( $\in [0,1]$ ), valors propers a 1 ens indiquen que la tecnologia presenta un baix impacte en el medi ambient. **Ne** és les necessitats d'energia ( $\in [0,1]$ ). **rNH4** és la capacitat de la tecnologia per eliminar l'amoni ( $\in [0,1]$ ). **IRbiològic** és el risc biològic de la tecnologia ( $\in [0,3]$ ). **Epi** és el potencial d'eutrofització ( $\in [0,\infty)$ ). **Epi màx** és el valor màxim del potencial d'eutrofització de les tecnologies comparades.

$$Epi = ([NO_3^-] \times EQ PO_4^{-3}) + ([PO_4^{-3}] \times EQ PO_4^{-3}) \quad (eq. 16)$$

En aquesta fórmula,  $[NO_3^-]$  i  $[PO_4^{-3}]$  són les concentracions de sortida de nitrats i fosfats de la tecnologia i. En ambdós casos, es multiplica la concentració per un factor equivalent d'EP de g/m<sup>3</sup> de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, com s'indica a la taula 2. L'eq.16 s'ha extret de l'article (Grajeda i Pocasangre, 2019). En aquest cas específic l'eutrofització es defineix com l'enriquiment de nutrients, com nitrogen i fòsfor en el medi aquàtic. Només s'han inclòs causants directes de l'eutrofització.

**Taula 2:** Factors d'equivalència EP g. eq PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (Grajeda i Pocasangre, 2019).

SUBSTANCIA	EP
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	0.35
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	0.42
Dixido de Nitrogeno (NO <sub>2</sub> )	0.13
DQO (Demanda Quimica de Oxigeno)	0.022
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , as P)	3.06
Fòsforo (P)	3.06
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0.095
Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	0.13
Nitrogeno (N <sub>2</sub> )	0.42
Oxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	0.27
Pentoxido de Fòsforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.336

### f. Economia circular

L'indicador d'economia circular té en compte la quantitat de recursos que es generen i que es poden reutilitzar o que poden tenir un benefici econòmic. En aquest estudi, se centra principalment en la reutilització de recursos sòlids generats per la tecnologia. Aquest indicador no només es podria incloure en el criteri medi ambient com una forma d'evitar l'ús de matèries primeres, sinó també en el criteri econòmic.

$$Economia\ circular = \frac{\frac{PBsolids}{3} + \frac{PBmassa}{3} + \frac{Faliment}{3}}{3} \quad (eq. 17)$$

**L'economia circular** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 ens indiquen una elevada capacitat de reutilització de recursos i d'ús dels recursos. **PBsolids** és la producció de biosòlids ( $\in [0,3]$ ). **PBmassa** és la producció de biomassa ( $\in [0,3]$ ). **Faliment** és la quantitat de fonts d'aliment ( $\in [0,3]$ ).

## 5. Adequació del sistema

### a. Durabilitat

L'indicador de durabilitat fa referència a la capacitat de la tecnologia de perdurar en el temps. Principalment, el concepte de durabilitat es podria entendre com la vida útil de la tecnologia. La vida útil sovint es veu condicionada per l'estructura de la tecnologia; si inclou elements mecànics, bombes o canonades, aquesta es redueix.

$$\text{Durabilitat del sistema} = \frac{Vi}{\text{Màxima Vi}} \quad (\text{eq. 18})$$

**La durabilitat del sistema** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 indiquen que la tecnologia presenta la capacitat de mantenir el funcionament al llarg d'una elevada quantitat de temps. **Vi** és la vida útil ( $\in [0,\infty]$ ). **Màxima Vi** és el valor màxim de la variable vida útil de les tecnologies comparades.

### b. Flexibilitat

L'indicador de flexibilitat fa referència a la capacitat de la tecnologia per ajustar-se i adaptar-se a diferents circumstàncies. Bàsicament, l'indicador vol avaluar la capacitat de la tecnologia per adaptar-se a noves condicions d'ús. A diferència de l'indicador de la capacitat d'optimitzar el sistema, aquest no només avalua la capacitat del sistema per mantenir l'eficiència durant les adaptacions, sinó que també considera altres aspectes com la temperatura, en una perspectiva més global.

$$\text{Flexibilitat del sistema} = \frac{\text{Capacitat d'optimitzar el sistema} + \frac{RT}{3}}{2} \quad (\text{eq. 19})$$

**La flexibilitat del sistema** ( $\in [0,1]$ ), els valors propers a 1 indiquen que la tecnologia presenta una alta flexibilitat per adaptar-se a noves circumstàncies. La capacitat d'optimitzar el sistema és un indicador calculat anteriorment ( $\in [0,1]$ ). **RT** és la capacitat reguladora de temperatura de la tecnologia ( $\in [0,3]$ ).

### c. Fiabilitat

L'indicador de fiabilitat té en compte la capacitat de les tecnologies per mantenir el rendiment al llarg del temps. La fiabilitat s'entén com la capacitat del sistema per mantenir una elevada eficiència en l'eliminació dels contaminants al llarg de la seva vida útil. És un indicador clau per avaluar la seguretat i constància d'una tecnologia.

$$\text{Fiabilitat} = \frac{\text{Eliminació de contaminants} + \text{Durabilitat del sistema}}{2} \quad (\text{eq. 20})$$



**La fiabilitat** ( $\in [0,1]$ ), valors propers a 1 indiquen una alta fiabilitat de la tecnologia. L'eliminació de contaminants és un indicador calculat anteriorment ( $\in [0,1]$ ). La durabilitat del sistema és un indicador calculat anteriorment ( $\in [0,1]$ ).

## 6. Integració i acceptació socials

### a. Integració del paisatge

L'indicador d'integració del paisatge fa referència a com una tecnologia s'integra en la natura. Es considera que un sistema presenta una elevada integració quan és capaç d'incorporar elements naturals i és capaç d'integrar-se en l'entorn adequadament. Bàsicament, l'indicador és un equilibri entre els aspectes funcionals i visuals de les tecnologies.

$$\text{Integració del paisatge} = \frac{GE + \frac{VE}{3}}{2} \quad (\text{eq. 21})$$

**La integració** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 ens indiquen una elevada integració al paisatge i en el medi natural. **VE** és el valor estètic ( $\in [0,3]$ ). **GE** és el grau d'integració en l'entorn ( $\in [0,1]$ ). Seguidament, es mostra la fórmula per calcular el grau d'integració en l'entorn.

$$GE = \frac{\frac{PBmassa}{3} + \frac{BP}{3} + \frac{BFL}{3}}{3} \quad (\text{eq. 22})$$

**PBmassa** és la producció de biomassa ( $\in [0,3]$ ). **BFL** és la biodiversitat de flora ( $\in [0,3]$ ). **BP** és la biodiversitat de pol·linitzadors ( $\in [0,3]$ ).

### b. Adaptacions a factors extrems

L'indicador d'adaptació a factors extrems considera els beneficis que les tecnologies poden proporcionar enfront de situacions extremes, siguin generades de manera natural o intensificades pel canvi climàtic. Es considera que els factors extrems inclouen grans inundacions, tempestes i èpoques de sequera. Bàsicament, té en compte la capacitat de mitigació de la tecnologia sobre les inundacions, la mitigació de pics de tempesta i la capacitat de reutilització.

$$\text{Adaptacions a factors extrems} = \frac{\frac{Minundació}{3} + \frac{Mtempesta}{3} + \frac{Reu}{3}}{3} \quad (\text{eq. 23})$$

**Les adaptacions a factors extrems** ( $\in [0,1]$ ), valors pròxims a 1 són de tecnologies amb una elevada adaptació a factors extrems. **Minundació** és la mitigació de la tecnologia a inundacions ( $\in [0,3]$ ). **Mtempesta** és la mitigació de la tecnologia a pics de tempesta ( $\in [0,1]$ ). **Reu** és la reutilització d'aigua dins de la tecnologia ( $\in [0,1]$ ).

### c. Acceptació social

L'indicador d'acceptació social fa referència al grau d'aprovació social d'una determinada tecnologia i ens mostra si és una tecnologia convivial. Aquesta acceptació es mesura a través del reconeixement i l'aprovació que rep la tecnologia. En l'estudi es planteja una fórmula fictícia amb totes les variables que s'han de tenir en compte en el càlcul de l'acceptació social. Per poder fer el següent càlcul, seria

necessari crear una escala quantitativa per poder quantificar les variables qualitatives que es tenen en compte.

$$\text{Acceptació social} = \left( \frac{\text{Percepció social} + \text{Beneficis socials} + \text{Perjudicis socials} + \text{Acceptació cultural} + \text{Seguretat social} + \text{Necessitat social}}{6} \right) \quad (\text{eq.24})$$

En aquest estudi, no s'aplica la fórmula anterior, ja que es disposa de dades quantitatives per poder quantificar l'indicador d'acceptació social. Es considera que aquest indicador està definit pels beneficis recreatius que pot aportar la tecnologia i per la biodiversitat que conserva o recupera.

$$\text{Acceptació social} = \frac{(1 - \frac{IR_{biologic}}{3}) + \frac{Rec}{3} + Biodiversitat}{3} \quad (\text{eq.25})$$

**Acceptació social** ( $\in [0,1]$ ), on valors propers a 1 ens indiquen una elevada acceptació de la societat en la tecnologia aplicada. **IRbiologic** són les inversions relacionades amb el risc biològic de la tecnologia ( $\in [0,3]$ ). **Rec** és la recreació que pot aportar la tecnologia ( $\in [0,3]$ ). La biodiversitat del sistema és un indicador calculat anteriorment ( $\in [0,1]$ ).

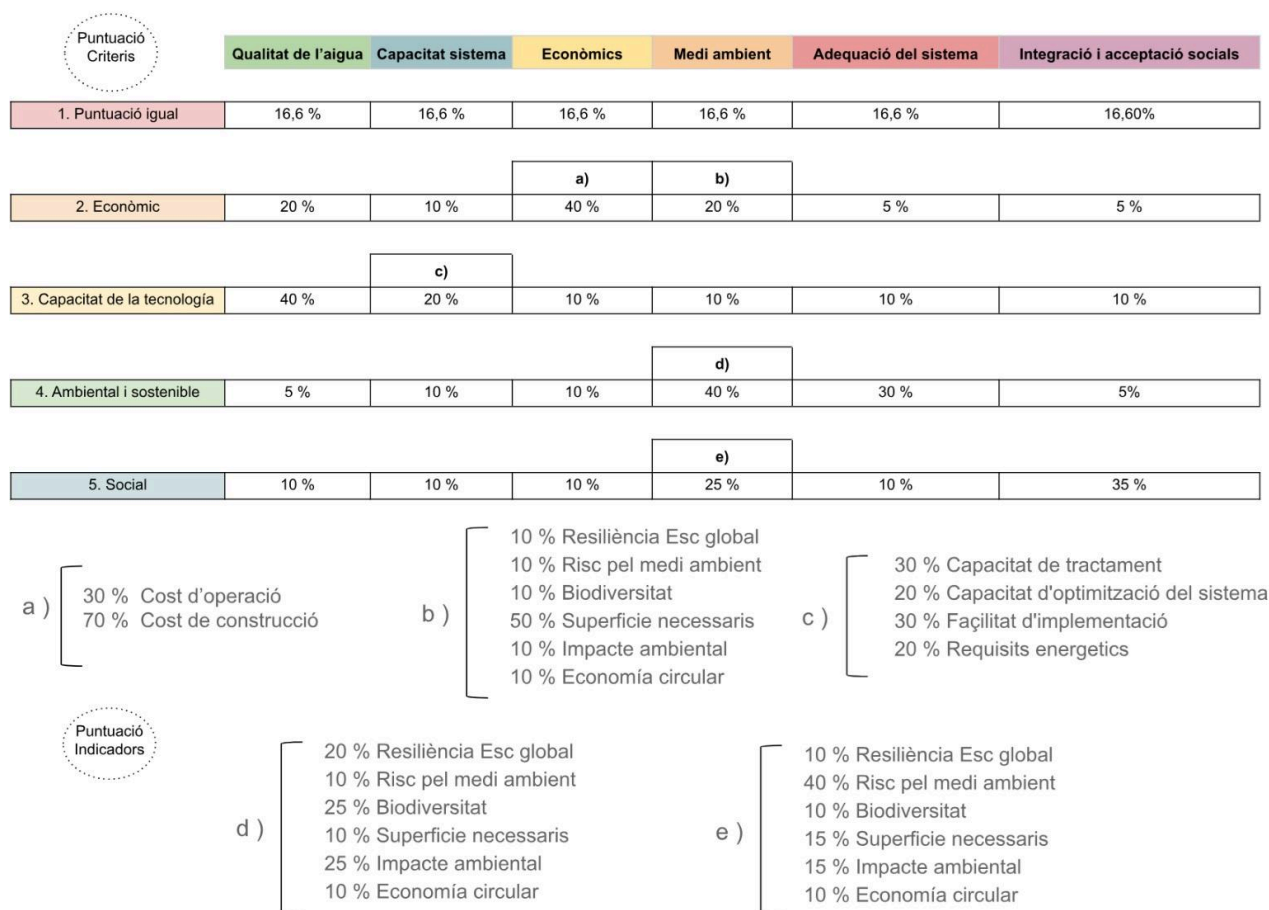
#### 4.3 PONDERACIÓ I RÀNQUING

Amb les fórmules dels indicadors determinades, es duu a terme una de les etapes finals de l'anàlisi multicriteri. L'objectiu d'aquesta etapa és la implantació dels càlculs dels diferents indicadors i l'aplicació de sistemes de ponderació per acabar generant un sistema de classificació.

Per realitzar l'anàlisi multicriteri, es divideixen les diferents tecnologies en 4 situacions. En cada situació s'inclouen les tecnologies que presenten la capacitat de tractar cada tipus d'aigua residual. Les tipologies d'aigua residual que s'han tingut en compte són: Aigües residuals domèstiques brutes, Aigües residuals domèstiques de tractament primari, Aigües grises i Aigües residuals tractades de tractament secundari. Es realitza la divisió de les tecnologies segons el tipus d'aigua residual per dur a terme una anàlisi multicriteri similar a l'anàlisi de l'eina en desenvolupament per l'Institut de Recerca Català de l'Aigua. En aquesta eina, l'usuari especificarà el tipus d'aigua residual que cal tractar. Les dades per identificar quines tecnologies poden tractar cada tipologia d'aigua residual es localitzen en la base de dades NAT4WAT (ICRA, 2024a).

Després d'aplicar la ponderació, es calculen els criteris a partir dels càlculs dels indicadors. En la majoria dels criteris s'aplica una mitjana ponderada en pesos iguals. En els casos específics en què s'apliquen pesos diferents s'especifica més endavant en els escenaris de ponderació, les cinc files en la figura 3.

Després de la divisió de les tecnologies segons les diferents situacions i del càlcul dels criteris, es plantegen diversos escenaris de ponderació. Principalment, es consideren 5 escenaris de ponderació per a cada tipus de situació d'aigua residual. Aquests 5 escenaris s'apliquen de la mateixa manera en les 4 situacions, generant un total de 20 escenaris de ponderació.



**Figura 3:** Els 5 escenaris de puntuació, on s'indica la puntuació dels diferents criteris i indicadors. En la taula ponderació de criteris i en la part inferior ponderació d'indicadors.

Un dels primers escenaris de puntuació és el de puntuacions iguals, on els pesos dels criteris i indicadors són iguals. Es té en compte un escenari de ponderació igual per poder comparar amb altres escenaris i observar si l'aplicació de ponderacions a determinats criteris i indicadors influeix en els resultats de l'anàlisi multicriteri.

Un altre escenari que s'ha considerat és l'econòmic, on la major part del pes recau en el criteri econòmic i en l'indicador del cost de construcció, el qual en molts casos és determinant si l'usuari considera el cost de la tecnologia. En aquest escenari també és destacable la importància de l'indicador de superfície necessària i el criteri de qualitat de l'aigua.

L'escenari de la capacitat de la tecnologia se centra en puntuar els criteris de qualitat de l'aigua i el de capacitat del sistema. Principalment, es vol donar importància als factors relacionats amb el tractament d'aigua i l'eliminació de contaminants, amb l'objectiu d'indicar les tecnologies amb major capacitat de tractament d'aigua.

La idea de l'escenari ambiental i sostenible és identificar aquelles tecnologies que presenten menor impacte i risc per al medi ambient, i una vida útil més llarga per evitar l'ús de matèries primeres, apostant així per tecnologies més sostenibles. Es ponderen criteris de risc i impacte ambiental, i es dona molta importància als criteris d'adequació del sistema, on la durabilitat, la flexibilitat i la fiabilitat presenten ponderacions iguals.

Finalment, l'escenari social se centra a identificar aquelles tecnologies que presenten menor impacte en la societat i major benefici, com la preservació de la biodiversitat i la recuperació d'espais naturals. Aquest escenari dona importància al criteri de risc per al medi ambient i a l'indicador d'integració i acceptació socials.

Per calcular el rànquing final de cada escenari i cada situació s'apliquen les ponderacions a la mitjana ponderada. El rànquing es calcula aplicant les mitjanes i les ponderacions dels diferents criteris. El rànquing ( $\in [0,1]$ ), valors propers a 1 ens indiquen que la tecnologia és la que presenta millors condicions en les ponderacions aplicades.

#### 4.4 RESULTATS DE L'APLICACIÓ

Tots els càlculs realitzats en l'anàlisi multicriteri dels diferents indicadors i criteris estan recollits en la taula de resultats (Ferrer, 2024e.). Estan dividits en les 4 situacions de diferents aigües residuals i una situació general amb totes les tecnologies, on es realitzen les anàlisis de comparació indicats en el punt 3.1.1. Els rànquings obtinguts de l'anàlisi multicriteri es mostren en la taula 3.

##### **i. Resultats de l'anàlisi multicriteri**

En el cas de les aigües residuals domèstiques brutes, el resultat més destacable és que, en 4 escenaris, la millor tecnologia és la combinació de *facultative pond + free water surface flow constructed wetland*. En l'escenari econòmic, la tecnologia amb millor puntuació és *surface aerated pond*. El valor més elevat que s'assoleix és de 0,615. En canvi, la tecnologia amb els valors més baixos en tots els escenaris és *facultative pond*, amb un valor mínim de 0,361. Les altres tecnologies se situen entre 0,4 i 0,6, amb un valor mitjà de 0,509 al llarg dels escenaris.

En el cas de les aigües residuals domèstiques de tractament primari, en la majoria d'escenaris es destaca la tecnologia *willow system* com la millor. En l'escenari econòmic i en l'escenari de la capacitat de la tecnologia, la tecnologia *free water surface treatment wetland* és la millor. En general, s'obté un valor màxim de 0,37. A l'altre extrem de la classificació, en la majoria d'escenaris, trobem la tecnologia *reciprocating treatment wetland* amb els valors més baixos, de 0,346, excepte en l'escenari de capacitat tecnològica, on *facultative pond* té el valor més baix. En general, els valors es mantenen al voltant de 0,503 al llarg dels escenaris.

En el cas de les aigües grises, en els 3 escenaris es destaca la tecnologia *willow system*. Pel que fa als escenaris de capacitat tecnològica i de l'econòmic, destaca la tecnologia *horizontal flow green wall*. El valor màxim que s'obté és de 0,721. A l'altre extrem de la classificació, trobem la tecnologia *vertical flow wetland with recycle and partial saturation*, que destaca pels valors més baixos en 3 escenaris. En l'escenari de capacitat tecnològica, la tecnologia amb menor valor és *facultative + maturation pond*, i en l'escenari econòmic, la tecnologia amb menor valor és *phytoparking*. El valor més baix que s'obté és de 0,4447. Els valors, en general, varien entre 0,4 i 0,7, amb un valor mitjà de 0,562 al llarg dels escenaris.

Finalment, en el cas de les aigües residuals tractades en tractament secundari, en la majoria d'escenaris la tecnologia *natural wetland* és la que presenta el valor més alt, amb un màxim de 0,708. Al contrari, la tecnologia *hydroponic system* presenta el valor més baix, de 0,413 en 3 escenaris. En els escenaris econòmic i de capacitat tecnològica, la tecnologia amb el valor més baix és *phytoparking*. En general, els valors varien entre 0,4 i 0,8, amb una mitjana de 0,542 en els diferents escenaris.

**Taula 3:** Rànquings de les 4 situacions d'aigua residual on s'exposen els 5 escenaris de puntuació diferenciats pel color. Les caselles amb colors més intensos presenten valors més elevats.

	Aigües residuals domèstiques brutes					Aigües residuals del tractament primari					Aigües grises					Aigües residuals de tractament secundari				
Aerated + free water surface wetland						0,537	0,526	0,569	0,552	0,522						0,537	0,526	0,569	0,552	0,522
Aerated treatment wetland	0,459	0,462	0,476	0,461	0,454	0,459	0,462	0,476	0,461	0,454	0,459	0,462	0,476	0,461	0,454					
Anaerobic + facultative pond	0,509	0,494	0,469	0,521	0,499	0,509	0,494	0,469	0,521	0,499										
Anaerobic + maturation pond	0,550	0,531	0,514	0,561	0,542	0,550	0,531	0,514	0,561	0,542										
Anaerobic pond	0,508	0,501	0,461	0,519	0,497	0,508	0,501	0,461	0,519	0,497										
Aquaponic system																0,460	0,466	0,472	0,455	0,451
Facultative + maturation pond	0,485	0,480	0,448	0,495	0,478	0,485	0,480	0,448	0,495	0,478	0,485	0,480	0,448	0,495	0,478	0,485	0,480	0,448	0,495	0,478
Facultative pond	0,427	0,426	0,380	0,438	0,419	0,427	0,426	0,380	0,438	0,419										
Facultative pond + Free water surface flow constructed wetland	0,602	0,588	0,598	0,618	0,587	0,602	0,588	0,598	0,618	0,587	0,602	0,588	0,598	0,618	0,587	0,602	0,588	0,598	0,618	0,587
Free water surface treatment wetland						0,643	0,634	0,644	0,655	0,631	0,643	0,634	0,644	0,655	0,631	0,643	0,634	0,644	0,655	0,631
French vertical flow treatment wetland	0,520	0,519	0,491	0,521	0,513															
Horizontal flow green wall											0,663	0,685	0,703	0,674	0,649	0,663	0,685	0,703	0,674	0,649
Horizontal flow treatment wetland						0,571	0,566	0,533	0,578	0,563	0,571	0,566	0,533	0,578	0,563	0,571	0,566	0,533	0,578	0,563
Horizontal flow treatment wetland + maturation pond											0,511	0,496	0,475	0,519	0,502	0,511	0,496	0,475	0,519	0,502
Hybrid living wall											0,514	0,512	0,552	0,527	0,505	0,514	0,512	0,552	0,527	0,505
Hydroponic system																0,446	0,481	0,463	0,442	0,434
In-stream restoration																0,671	0,679	0,661	0,680	0,651
Maturation pond																0,481	0,467	0,442	0,491	0,472
Natural wetland																0,740	0,710	0,744	0,755	0,726
Phytoparking						0,432	0,432	0,437	0,436	0,431	0,432	0,432	0,437	0,436	0,431	0,432	0,432	0,437	0,436	0,431
Rain garden with treatment											0,640	0,661	0,635	0,648	0,634					
Rapid-rate soil infiltration system											0,502	0,499	0,509	0,513	0,497	0,502	0,499	0,509	0,513	0,497
Reactive media in treatment wetland						0,571	0,569	0,541	0,578	0,567						0,571	0,569	0,541	0,578	0,567
Reciprocating treatment wetland						0,392	0,399	0,411	0,396	0,387										
Rhizosph'air aerated french wetland	0,468	0,459	0,485	0,479	0,452	0,468	0,459	0,485	0,479	0,452										
Rooftop treatment wetland											0,506	0,492	0,546	0,520	0,501	0,506	0,492	0,546	0,520	0,501
Slow-rate soil infiltration system											0,576	0,566	0,530	0,591	0,573	0,576	0,566	0,530	0,591	0,573
Surface aerated pond	0,518	0,535	0,534	0,517	0,513	0,518	0,535	0,534	0,517	0,513	0,518	0,535	0,534	0,517	0,513	0,518	0,535	0,534	0,517	0,513
Treatment wetland for CSO																				
Vertical flow + Horizontal flow treatment wetland						0,588	0,587	0,560	0,596	0,581										
Vertical flow green wall											0,631	0,650	0,672	0,641	0,617	0,631	0,650	0,672	0,641	0,617
Vertical flow treatment wetland						0,555	0,559	0,528	0,560	0,548	0,555	0,559	0,528	0,560	0,548	0,555	0,559	0,528	0,560	0,548
Vertical flow wetland with recycle and partial saturation						0,443	0,458	0,459	0,445	0,443	0,443	0,458	0,459	0,445	0,443	0,443	0,458	0,459	0,445	0,443
Willow system						0,679	0,657	0,658	0,694	0,673	0,679	0,657	0,658	0,694	0,673	0,679	0,657	0,658	0,694	0,673



## 4.5 RELACIÓ ENTRE ELS DIFERENTS CRITERIS I INDICADORS

Ja realitzada una gran part de l'anàlisi multicriteri, aquesta darrera etapa se centra a fer una anàlisi de comparacions entre diferents indicadors i variables. En aquesta etapa es realitzen 2 anàlisis de comparació diferents:

### **i. Comparació dels indicadors de l'estudi**

En aquest apartat s'analitzen els resultats de la matriu de correlació realitzada en els diferents indicadors de l'estudi. Principalment, s'ha detectat que només hi ha 8 relacions d'indicadors superiors a 0,9 o inferiors a -0,9. De les quals, 6 són relacions entre les variants de l'indicador de capacitat de tractament, amb una relació de 0,99 entre les diferents localitzacions. La següent relació més elevada és la dels indicadors d'integració del paisatge i biodiversitat, amb un coeficient de 0,95, seguida de la relació entre els indicadors de fiabilitat i durabilitat, amb un coeficient de 0,949.

Altres relacions elevades detectades inclouen: la relació entre l'indicador d'acceptació social i biodiversitat, amb un coeficient de 0,861; la relació entre l'indicador d'adaptació a factors extrems i integració en el paisatge, amb un coeficient de 0,855; la relació entre l'indicador de risc ambiental i eliminació de contaminants, amb un coeficient de 0,853; la relació entre l'indicador d'acceptació social i integració en el paisatge, amb un coeficient de 0,829; la relació entre l'indicador d'adaptació a factors extrems i biodiversitat, amb un coeficient de 0,818; i la relació entre l'indicador d'impacte ambiental i requisits energètics, amb un coeficient de 0,789.

Un altre resultat destacable és que, al contrari de l'indicador de capacitat de tractament, l'indicador de resiliència a l'escalfament global no presenta correlacions elevades entre les seves variants de localització.

### **ii. Comparació de les fórmules de cost construcció, cost d'operació i superfície necessària**

En el procés de desenvolupament de les fórmules dels diferents indicadors es van detectar una sèrie de desviacions en els indicadors de cost de construcció, cost d'operació i superfície necessària. Aquestes desviacions es deuen a l'elevada variabilitat dels valors en les tres variables utilitzades. Aquesta elevada variabilitat provoca que l'aplicació de diferents fórmules normalitzades doni com a resultat valors generals amb una elevada tendència a 1 o a 0, amb resultats poc representatius de les dades de les variables que no permeten realitzar una comparació adequada.

Principalment, es van plantejar 4 fórmules diferents per calcular els 3 indicadors. S'ha tingut en compte una fórmula que utilitzi el valor mínim, una el valor màxim i una altra que tingui en compte els valors màxims i mínims alhora. També s'utilitza una quarta fórmula similar a la que utilitza els valors màxims i mínims però amb transformació logarítmica en base 10. S'utilitza aquesta transformació ja que són molt útils per reduir la presència de valors elevats (Molina, 2014). Amb l'aplicació del logaritme es redueix el rang de valors, disminuint la variabilitat de les dades de les variables i d'aquesta manera s'aconsegueix tenir valors més similars entre ells amb menor variació.

Cost de construcció:

$$\frac{\text{Mínim cost construcció}}{\text{Cost construcció}} \text{ eq 27 } 1 - \frac{\text{cost construcció}}{\text{màxim cost construcció}} \text{ eq 28 } 1 - \frac{\text{Cmp} - \text{Mínim Cmp}}{\text{Maxim Cmp} - \text{Mínim Cmp}} \text{ eq 29}$$

Cost de manteniment:

$$\frac{\text{Mínim cost manteniment}}{\text{Cost manteniment}} \text{ eq 30 } 1 - \frac{\text{cost manteniment}}{\text{màxim cost manteniment}} \text{ eq 31 } 1 - \frac{\text{CCp} - \text{Mínim CCp}}{\text{Maxim CCp} - \text{Mínim CCp}} \text{ eq 32}$$

Superfície necessària:

$$\frac{\text{Mínim Superfície}}{\text{Cost Superfície}} \text{ eq 33 } 1 - \frac{\text{cost Superfície}}{\text{màxim Superfície}} \text{ eq 34 } 1 - \frac{\text{Si} - \text{Mínim Si}}{\text{Maxim Si} - \text{Mínim Si}} \text{ eq 35}$$

**Totes les fórmules** ( $\in [0,1]$ ), amb valors propers a 1, indica que el cost de construcció /cost d'operació o superfície necessària de la tecnologia és molt baixa. **Cmp** és el cost de construcció ( $\in [0,\infty)$ ). **CCp** és el cost de manteniment ( $\in [0,\infty)$ ). **Si** és la superfície necessària ( $\in [0,\infty)$ ). **Mínim (X) abreviatura** és el valor mínim d'aquella variable. **Màxim (X) abreviatura** és el valor màxim d'aquella variable. Les equacions amb transformacions logarítmiques es troben en l'apartat de la formulació dels indicadors amb les eq 7, eq 9 i eq 14, respectivament.

Per comparar es calculen totes les variants dels indicadors plantejats i es realitza una matriu de correlació en cadascun dels 3 indicadors. També es calcula la mediana de cadascun dels indicadors per veure on es concentren la majoria de les dades.

La matriu de correlació s'ha generat de manera independent per als tres indicadors, però posteriorment s'han comparat conjuntament els resultats per la seva elevada similitud. A la taula 4 es mostra un exemple d'una de les tres matrius de correlació aplicades a la variable de cost de manteniment, on també s'inclouen les dades de la mediana. En els tres casos, es pot observar que les fórmules (**eq. 28, 31 i 34**) i (**eq. 29, 32 i 35**) presenten una alta relació, amb un valor de correlació d'1 en les tres matrius, indicant una proporció molt similar. En canvi, les fórmules (**eq. 27, 30 i 33**) presenta una baixa relació amb totes les altres fórmules, sent les fórmules (**eq. 7, 9 i 14**) amb la qual més relació presenta. Aquestes relacions es reflecteixen en els valors de la mediana, on les fórmules (**eq. 28, 31 i 34**) i (**eq. 29, 32 i 35**) són molt similars amb valors d'1 i les fórmules (**eq. 27, 30 i 33**) amb valors de 0. En el cas de les fórmules (**eq. 7, 9 i 14**), es pot observar que és la que presenta una mediana més normalitzada. Aquesta fórmula també presenta una relació notable amb les altres fórmules considerades.

**Taula 4:** Matriu de correlació dels resultats de les 4 tipologies de fórmules aplicades en l'indicador de cost de manteniment.

Mediana	0,690	0,000	0,994	0,994
	(eq. 7, 9 i 14)	(eq. 27, 30 i 33)	(eq. 28, 31 i 34)	(eq. 29, 32 i 35)
(eq. 7, 9 i 14)	x	0,261	0,730	0,730
(eq. 27, 30 i 33)	-	x	0,101	0,101
(eq. 28, 31 i 34)	-	-	x	1,000
(eq. 29, 32 i 35)	-	-	-	x

## 5. DISCUSSIÓ

En aquest estudi, s'han desenvolupat criteris i indicadors per crear un sistema de presa de decisions que permeti comparar tecnologies basades en la natura per al tractament d'aigua residual. Una visió més sostenible ha permès el desenvolupament de criteris més específics que descriuen millor les prioritats de la instal·lació, no només tenint en compte factors tècnics. Això mostra que aquesta visió hauria de ser considerada no només en les solucions basades en la natura, sinó també en les tecnologies convencionals. Al final per l'estudi s'han considerat 6 criteris i 19 indicadors. Tot i que s'ha contemplat una elevada varietat encara és necessari desenvolupar més indicadors per poder complementar millor l'avaluació, com en el cas específic del criteri de qualitat de l'aigua, que només presenta un indicador.

La idea principal del desenvolupament de diferents escenaris de ponderació és seleccionar els criteris i indicadors clau en la prioritització de les diferents tecnologies. Es considera que les ponderacions aplicades són conservadores, ja que sempre es ponderen tots els criteris. En general, s'observa un patró en les quatre situacions d'aigua residual estudiades, on les tecnologies amb la mitjana més elevada en l'escenari de puntuació igual solen destacar també en altres escenaris. El mateix patró es repeteix a l'altra banda de la classificació amb la tecnologia menys valorada. Els resultats mostren una consistència en els diferents escenaris de puntuació, indicant que els criteris i indicadors proporcionen una avaluació equilibrada de les tecnologies. No obstant això, cal tenir en compte que aquest patró es trenca en alguns escenaris, com el de les aigües grises i les aigües residuals domèstiques de tractament primari, on s'observa una variació més notable dels resultats. Segons els resultats obtinguts, potser seria recomanable utilitzar unes ponderacions més dràstiques, tenint en compte només els criteris que afecten exclusivament cada escenari.

Els estudis de comparació mostren principalment que les variacions segons la localització dels indicadors de capacitat de tractament no són rellevants i no suposen cap canvi en els resultats. També s'observa una elevada similitud entre els indicadors de fiabilitat i durabilitat, cosa que suggereix que es podria considerar utilitzar només un indicador per evitar possibles repeticions. D'altra banda, l'elevada relació entre l'indicador d'integració del paisatge i la biodiversitat suggereix el cas contrari, on la similitud no es deu a la similitud de les dades, sinó a la similitud dels conceptes, ja que són dos conceptes estretament lligats. Finalment, les comparacions de les fórmules de costos i superfície mostren que la transformació logarítmica millora la representació de les dades i redueix la seva variabilitat, aplicant en l'estudi la fórmula que millor representa les dades de les variables.

## 6. LIMITACIONS DEL PROJECTE I DESENVOLUPAMENT PEL FUTUR

Una de les principals limitacions del projecte és la disponibilitat de dades, ja que moltes de les fórmules dels indicadors s'han desenvolupat segons les dades disponibles. Una altra limitació important se centra en l'indicador de capacitat per optimitzar el sistema. Aquest indicador tendeix a afavorir les tecnologies que presenten una elevada eliminació de contaminants i una capacitat d'afegir fluxos alta. Les tecnologies que ja tenen una elevada eliminació podrien quedar infravalorades si no presenten capacitat d'afegir fluxos al sistema. Tot i aquesta limitació, l'indicador s'ha mantingut en l'estudi per la seva importància en avaluar la capacitat de millorar l'eliminació de contaminants afegint nous fluxos en el procés.



A causa de la falta de dades, algunes idees conceptuals de fórmules plantejades inicialment no es van poder dur a terme. A continuació es mostren aquests conceptes per possibles desenvolupament pel futur: **L'indicador de facilitat d'operació** considera la necessitat de mà d'obra, materials i productes químics al llarg del funcionament de la tecnologia. **L'indicador d'estat ecològic** avalua l'impacte ambiental de la tecnologia, les pertorbacions que pot causar en el medi ambient i la seva relació amb el medi. **L'indicador de requisits ambientals** se centra a identificar-les necessitats de temperatura, radiació solar i condicions climàtiques que requereix cada tecnologia.

També s'ha plantejat un **indicador d'amortització** que té en compte el cost de construcció i la vida útil de cada tecnologia. Aquest indicador es podria aplicar sumant l'indicador de cost de construcció i el de durabilitat, i dividint entre 2. Al final per logística, no s'ha tingut en compte en l'estudi, però per a futures investigacions s'hauria de tenir present.

Seguidament, es mostren diferents aspectes d'indicadors utilitzats en l'estudi que es podrien considerar en un futur si es disposés de més dades.

En el cas de l'indicador d'eliminació de la contaminació, només es disposa de dades de patògens per determinar els contaminants microbiològics. Per a futurs estudis, seria adequat incloure microcontaminants orgànics i contaminants emergents. A més, si es disposés de dades de metalls, també s'haurien d'incloure en la fórmula, ja que l'eliminació de metalls pot ser determinant a l'hora d'escollir una tecnologia segons la seva eficiència d'eliminació.

En el cas de l'indicador de risc per al medi ambient, seria adequat incloure microcontaminants orgànics i metalls pesants en la fórmula si es disposés de les dades. Cal tenir en compte que, segons el risc establert, els metalls pesants presenten un risc de 3 i els microcontaminants un risc de 2.

## 7. CONCLUSIONS

In the course of the study, a multi-criteria analysis has been carried out and, in general, it can be considered a useful and viable analysis for comparing natural wastewater treatment solutions. In conclusion, the determination of indicators and criteria as well as the determination of weighting scenarios are decisive and key parts of the analysis.

In the following, the most relevant conclusions derived from the results obtained are shown:

Establishing criteria and indicators based on a broad perspective, including economic, social and environmental aspects, allows us to take a more sustainable view. This sustainable perspective has allowed us to integrate social aspects, such as public acceptance, environmental aspects, such as ecological impact, and economic aspects, such as investment costs. This approach has given us the opportunity to conduct a more exhaustive analysis and represents a more holistic view of all the factors that can influence the installation of a wastewater treatment NBS.

The application of multi-criteria analysis in various wastewater treatment situations has allowed us to see a practical example of its use and to detect different patterns conditioned by the use of very conservative scoring scenarios, where all indicators are considered. It has also demonstrated the effectiveness of the analysis in determining the best solution, including more diverse and sustainable criteria and indicators. This shows its utility in comparing natural wastewater treatment solutions.

During the analysis, 19 indicators were developed, and only two significant relationships were identified between the indicators in the study. In this comparison, variations in the system capacity indicator were excluded. At the end of the analysis it was considered that, due to the similarity between the durability and reliability formulae, the latter could be omitted.

Finally, it is crucial to note that the criteria and indicators of the study have been created taking into account the available data. It is important to note that for future studies, a more extensive information base could provide a more complete and complex analysis.

## 8. BIBLIOGRAFIA

Acuña, V., Castañares, L., Castellar, J., Comas, J., Cross, K., Istenič, D., ... & Corominas, L. (2023). Development of a decision-support system to select nature-based solutions for domestic wastewater treatment. *Blue-Green Systems*, 5(2), 235-251.

<https://iwaponline.com/bgs/article/doi/10.2166/bgs.2023.005/99349>

Alamanos, A. (2021). A framework to assess wetlands potential as nature-based solutions. In *Conference of the Chartered Institute of Ecology and Environmental Management (CIEEM) "Nature Based Solutions—Opportunities in a time of biodiversity crisis and climate emergency"*. [https://www.researchgate.net/profile/Angelos-Alamanos/publication/351281909\\_A\\_framework\\_to\\_assess\\_wetlands\\_potential\\_as\\_Nature-based\\_Solutions/links/608f9eef458515d315f0e8fe/A-framework-to-assess-wetlands-potential-as-Nature-based-Solutions.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Angelos-Alamanos/publication/351281909_A_framework_to_assess_wetlands_potential_as_Nature-based_Solutions/links/608f9eef458515d315f0e8fe/A-framework-to-assess-wetlands-potential-as-Nature-based-Solutions.pdf)

Alves, A., van Opstal, C., Keijzer, N., Sutton, N., i Chen, W. S. (2024). Planning the multifunctionality of nature-based solutions in urban spaces. *Cities*, 146, 104751.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264275123005632>

Balaguer, M. Salgot M., Sánchez-Marrè, M., Turon, C., i Puig, M. (2007). Gestió i tractament d'aigües residuals.

[https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/761/gestio\\_aigues\\_residuals.pdf?sequence=8](https://dugi-doc.udg.edu/bitstream/handle/10256/761/gestio_aigues_residuals.pdf?sequence=8)

Brans, J. P., i De Smet, Y. (2016). PROMETHEE methods. Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys, 187-219.

[https://www.researchgate.net/profile/Yves-De-Smet/publication/297791312\\_PROMETHEE\\_methods/links/5b3f3733aca27207851cc6d6/PROMETHEE-methods.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yves-De-Smet/publication/297791312_PROMETHEE_methods/links/5b3f3733aca27207851cc6d6/PROMETHEE-methods.pdf)

Cegan, J. C., Filion, A. M., Keisler, J. M., i Linkov, I. (2017). Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. *Environment Systems and Decisions*, 37, 123-133.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10669-017-9642-9>

Cinelli, M., Coles, S. R., i Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi-criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological indicators*, 46, 138-148.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X14002647>

Cross, K., Tondera, K., Rizzo, A., Andrews, L., Pucher, B., Istenič, D., ... i McDonald, R. (2021). *Nature-Based Solutions for Wastewater Treatment*. IWA Publishing.

Debele, S. E., Leo, L. S., Kumar, P., Sahani, J., Ommer, J., Bucchignani, E., ... i Di Sabatino, S. (2023). Nature-based solutions can help reduce the impact of natural hazards: A global analysis of NBS case studies. *Science of the Total Environment*, 902, 165824.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723044492>

Enel. (2023). *Resiliencia ecológica*.

<https://www.enel.com/es/nuestra-compania/historias/articles/2023/03/resiliencia-ecologica>

European Union. (2014). *Evaluation methodological approach*.

[https://capacity4dev.europa.eu/groups/evaluation\\_guidelines/discussions\\_en](https://capacity4dev.europa.eu/groups/evaluation_guidelines/discussions_en)

Ferrer, F. (2024a). TFG Recopilació de dades de cost, de superfície, de persones subministrades i del hydraulic loading rate. Document amb cites bibliogràfics.

[https://docs.google.com/document/d/14OFVRe05KfTkYL\\_WFd\\_TY\\_iL---Q7tZdlhlq2k9GU/edit?usp=drive\\_link](https://docs.google.com/document/d/14OFVRe05KfTkYL_WFd_TY_iL---Q7tZdlhlq2k9GU/edit?usp=drive_link)

Ferrer, F. (2024b). TFG Recopilació de dades de compatibilitat / capacitat d'afegir nous fluxos. Document amb cites bibliogràfics.

[https://docs.google.com/document/d/1oWcAzCl4sOh1-sVXchVs6V\\_d\\_rmBMbC1Uq2yjK4HIhM/edit?usp=drive\\_link](https://docs.google.com/document/d/1oWcAzCl4sOh1-sVXchVs6V_d_rmBMbC1Uq2yjK4HIhM/edit?usp=drive_link)

Ferrer, F. (2024c). TFG Recopilació de dades de compatibilitat / capacitat d'afegir nous fluxos. Document amb cites bibliogràfics.

[https://docs.google.com/document/d/1-zs\\_6r33pn5VOfkY0hy8OHE6JMjxx9ZJ3G6iUDFAPzE/edit?usp=drive\\_link](https://docs.google.com/document/d/1-zs_6r33pn5VOfkY0hy8OHE6JMjxx9ZJ3G6iUDFAPzE/edit?usp=drive_link)

Ferrer, F. (2024d). all\_technologies\_Calculs\_ind\_i\_crit. Full de càlcul.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1TWc42rvpJsxUsBfiOCGuUdzErTypfO1uAOsrJELW0zw/edit?usp=sharing>

Ferrer, F. (2024e). TFG Càlculs de dades de cost, de superfície, de persones subministrades i del hydraulic loading rate. Full de càlcul.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1g0kxUyxbOOop44drXcO3enCyESex7tVvW7yit8VdBck/edit?usp=sharing>

Figueira, J., Greco, S., Ehrogott, M., i Dyer, J. S. (2005). MAUT—multiattribute utility theory. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, 265-292.

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-23081-5\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-23081-5_7)

Ghaffar, E. A., i Ei Saddi, A. (2007). Wastewater natural treatment using multi-criteria decision analysis technique. In *Eleventh International Water Technology Conference, IWTC11*.

[Multi-criteria-analysis-approach-for-selection-of-the-most-appropriate-technology-for-municipal-wastewater-treatment.pdf \(researchgate.net\)](#)

Gichamo, T., Gökçekuş, H., Uzun Ozsahin, D., Gelete, G., i Uzun, B. (2021). Ranking of natural wastewater treatment techniques by Multi-criteria Decision Making (MCDM) methods. *Application of Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental and Civil Engineering*, 87-100.

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64765-0\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-64765-0_11)

Govindan, K., i Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 1-29.

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7699334/mod\\_resource/content/1/ELECTRE%20review.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7699334/mod_resource/content/1/ELECTRE%20review.pdf)

Grajeda, C. M., i Pocasangre, A. (2019). Determinación de impactos ambientales en planta de tratamiento de aguas residuales mediante análisis de ciclo de vida ambiental-ACV. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 14(1), 85-94.

<https://revistas.usac.edu.gt/index.php/asa/article/download/1187/801>

Hemming, V., Burgman, M. A., Hanea, A. M., McBride, M. F., & Wintle, B. C. (2018). A practical guide to structured expert elicitation using the IDEA protocol. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(1), 169-180.

<https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/2041-210X.12857>

ICRA. (2024a) all\_technologies. Full de càlcul.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/13v4RY1VnU8hwTW\\_xLhc79Vems3An4Rj37aqCI8eVVWI/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/spreadsheets/d/13v4RY1VnU8hwTW_xLhc79Vems3An4Rj37aqCI8eVVWI/edit?usp=sharing)

Pueyo-Ros, J i Comas, J. (2024). *NAT4WAT*. <https://nat4wat.icradev.cat/home>

ICRA. (2024b). *treatment\_sci\_publication\_details*. Full de càlcul. [https://docs.google.com/spreadsheets/d/1VC1V9LUqdxO3VvMZgELjvMjvUD99DPVoEjZBquYsiA/edit?usp=s\\_haring](https://docs.google.com/spreadsheets/d/1VC1V9LUqdxO3VvMZgELjvMjvUD99DPVoEjZBquYsiA/edit?usp=s_haring)

Institut de Drets Humans de Catalunya. (s. d.). *Informe sobre la situació dels drets humans al món*. [https://www.idhc.org/arxius/recerca/CDHE\\_04.pdf](https://www.idhc.org/arxius/recerca/CDHE_04.pdf)

Kalbar, P. P., Karmakar, S., i Asolekar, S. R. (2012). Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *Journal of environmental management*, 113, 158-169. <https://www.academia.edu/download/46176118/j.jenvman.2012.08.02520160602-13926-10s1bco.pdf>

Mans Unides. (s.d.). *Conseqüències de l'escalfament global*. <https://www.mansunides.org/observatori/canvi-climatic/consequencies-escalfament-global>

Masoud, A. M., Belotti, M., Alfarrà, A., i Sorlini, S. (2022). Multi-criteria analysis for evaluating constructed wetland as a sustainable sanitation technology, Jordan case study. *Sustainability*, 14(22), 14867. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/22/14867#B24-sustainability-14-14867>

Molina, M. (2014). Ciencia sin seso...locura doble. *Transformación de datos*. <https://www.cienciasinseso.com/transformacion-de-datos/>

Vilardo, V. (s. d.). Mujeres en red, el periódico feminista. *Mujeres, TIC y transparencia*. <https://www.mujeresenred.net/spip.php?article1762>

Nikolakopoulou, M. G. (2021). The functional role of emergent macrophytes in nature-based solutions (NBS) aiming to mitigate nutrient loading in freshwater ecosystems. *Anaerobic*

Pavlovskaja, E. (2014). Sustainability criteria: their indicators, control, and monitoring (with examples from the biofuel sector). *Environmental Sciences Europe*, 26, 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12302-014-0017-2>

Pueyo-Ros, J. (n.d.). *Reference manual*. Document en desenvolupament. Data de consulta, maig de 2024.

Retema. (s.d.). *Economía circular y biodiversidad en el tratamiento de aguas residuales*. <https://www.retema.es/articulos-reportajes/economia-circular-y-biodiversidad-en-el-tratamiento-de-aguas-residuales>

Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and decision*, 31, 49-73.

Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Plavšić, J., Doong, D. J., Bahlmann, T., Alves, A., ... i Franca, M. J. (2021). Incorporating stakeholders' preferences into a multi-criteria framework for planning large-scale Nature-Based Solutions. *Ambio*, 50, 1514-1531. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-020-01419-4>

Ruiz Elvira, A. (2021). Olas de calor en América y frío en España: consecuencias del calentamiento del polo. <https://www.iagua.es/blogs/antonio-ruiz-elvira-serra/olas-calor-america-y-frio-espana-consecuencias-calentamiento-polo>

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical modelling*, 9(3-5), 161-176. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738?ref=pdf\\_download&fr=RR-7&rr=8853cb969a0b6d90](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0270025587904738?ref=pdf_download&fr=RR-7&rr=8853cb969a0b6d90)

Sauril, D., i Ribas, A. (2022). Les desigualtats en l'accés als serveis d'aigua i sanejament al món: un enfocament multiescalar. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 68(3), 553-561.

[https://ddd.uab.cat/pub/dag/dag\\_a2022v68n3/dag\\_a2022v68n3p553.pdf](https://ddd.uab.cat/pub/dag/dag_a2022v68n3/dag_a2022v68n3p553.pdf)

Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2013). *International Day for Biological Diversity: Water and Biodiversity*. <https://www.cbd.int/idb/doc/2013/booklet/idb-2013-booklet-en.pdf>

Termcat. (s.d.). *Descontaminació - Diccionari d'enginyeria civi*.  
<https://www.termcat.cat/es/diccionaris-en-linia/240/fitxa/MzU2MzgwMQ%3D%3D>

Universitat Politècnica de València. (2021). *Veracitat en l'era de les notícies falses*.  
<https://cienciagandia.webs.upv.es/ca/2021/11/veracitat-en-lera-de-les-noticies-falses/>

Uzun, B., Taiwo, M., Syidanova, A., i Uzun Ozsahin, D. (2021). The technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). *Application of multi-criteria decision analysis in environmental and civil engineering*, 25-30.

[https://www.researchgate.net/profile/Tagesse-Gichamo/publication/349693277\\_Ranking\\_of\\_Natural\\_Wastewater\\_Treatment\\_Techniques\\_by\\_Multi-criteria\\_Decision\\_Making\\_MCDM\\_Methods/links/60911637458515d315f5c886/Ranking-of-Natural-Wastewater-Treatment-Techniques-by-Multi-criteria-Decision-Making-MCDM-Methods.pdf#page=30](https://www.researchgate.net/profile/Tagesse-Gichamo/publication/349693277_Ranking_of_Natural_Wastewater_Treatment_Techniques_by_Multi-criteria_Decision_Making_MCDM_Methods/links/60911637458515d315f5c886/Ranking-of-Natural-Wastewater-Treatment-Techniques-by-Multi-criteria-Decision-Making-MCDM-Methods.pdf#page=30)

Viquipèdia. (s.d.). *Mitjana ponderada*. [https://ca.wikipedia.org/wiki/Mitjana\\_ponderada](https://ca.wikipedia.org/wiki/Mitjana_ponderada)

Wijekoon, K. C., Visvanathan, C., i Abeynayaka, A. (2011). Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology*, 102(9), 5353-5360.  
[https://www.researchgate.net/profile/Nevine-Atta/publication/268405109\\_EFFECT\\_OF\\_ORGANIC\\_LOADING\\_RATE\\_AND\\_TEMPERATURE\\_ON\\_THE\\_PERFORMANCE\\_OF\\_HORIZONTAL\\_BIOFILTERS/links/55560b5c08ae980ca60c8094/EFFECT-OF-ORGANIC-LOADING-RATE-AND-TEMPERATURE-ON-THE-PERFORMANCE-OF-HORIZONTAL-BIOFILTERS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nevine-Atta/publication/268405109_EFFECT_OF_ORGANIC_LOADING_RATE_AND_TEMPERATURE_ON_THE_PERFORMANCE_OF_HORIZONTAL_BIOFILTERS/links/55560b5c08ae980ca60c8094/EFFECT-OF-ORGANIC-LOADING-RATE-AND-TEMPERATURE-ON-THE-PERFORMANCE-OF-HORIZONTAL-BIOFILTERS.pdf)

Wikipedia. (s.d.). Root Mean Square. [https://en.wikipedia.org/wiki/Root\\_mean\\_square](https://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square)

Yahya, M. N., Gökçekuş, H., i Ozsahin, D. U. (2020). Comparative analysis of wastewater treatment technologies. *Jurnal Kejuruteraan*, 32(2), 221-230.  
<https://www.academia.edu/download/80539474/06.pdf>

Zhao, J., Smith, T., Lavigne, M., Aenishaenslin, C., Cox, R., Fazil, A., ... i Hermant, B. (2022). A rapid literature review of multi-criteria decision support methods in the context of one health for all-hazards threat prioritization. *Frontiers in Public Health*, 10, 861594.  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2022.861594/full>