

# Reducció de la contaminació a la UEFA Champions League

**Assignatura: Ajust de Models d'Optimització**

Curs: 2025-2026

*Professora: Dra. Sundus Zafar*

Lucas Carbó (1707511), Martí Gasol (1620225),  
Abel Guàrdia (1709303), Hèctor Rodríguez (1704252)

# Introducció

La **UEFA Champions League** és la competició de clubs més prestigiosa del futbol europeu i, probablement, del món. Creada l'any 1955 sota el nom de *Copa d'Europa*, va néixer amb l'objectiu d'enfrontar els millors equips de cada país en un torneig continental. Amb el pas dels anys, el format ha evolucionat, i des del 1992 es coneix com a *Champions League*, incorporant fases de grups i més participants.

Històricament, la Champions ha estat l'escenari on s'han forjat llegendes com Di Stéfano, Cruyff, Maldini, Zidane o Messi, i on clubs com el Reial Madrid, el Milan o el Liverpool han construït la seva identitat guanyadora. Més enllà del trofeu, la Champions simbolitza l'excel·lència, la tradició i el somni de qualsevol jugador: competir al màxim nivell i deixar empremta en la història del futbol europeu.

El sorteig de la UEFA Champions League distribueix els 36 equips classificats en quatre pots segons el seu coeficient UEFA, que reflecteix el rendiment europeu dels últims cinc anys: el Pot 1 inclou els clubs amb millor puntuació, mentre que el Pot 4 agrupa els de menor experiència internacional. Cada equip és emparellat amb dos rivals de cada pot —inclos el seu propi— per disputar un total de vuit partits: quatre com a local i quatre com a visitant. Això significa que cada partit es juga contra un equip diferent, i sempre provenint d'un dels quatre pots. El sorteig garanteix que cap club s'enfronti a més de dos equips del mateix país ni a rivals de la seva pròpia federació, assegurant una competició equilibrada i diversa.

L'objectiu del nostre projecte és reduir la distància que han de recórrer els equips, amb la finalitat de minimitzar les emissions de CO<sub>2</sub> i contribuir a la sostenibilitat del planeta. Tot això es fa respectant les normes pròpies del torneig, per tal de garantir la igualtat d'oportunitats i mantenir la competitivitat esportiva.

Aquest projecte busca demostrar que és possible compatibilitzar l'espectacle esportiu amb la responsabilitat mediambiental, i que petits ajustos logístics poden tenir un impacte significatiu en la petjada ecològica del futbol europeu. A més, promou una reflexió col·lectiva sobre el paper que poden jugar les grans competicions en la lluita contra el canvi climàtic, tot obrint la porta a una nova manera d'organitzar els esdeveniments esportius amb criteris de sostenibilitat.

# Revisió de literatura: una revisió de la recerca rellevant i solucions existents

Diversos estudis coincideixen que els desplaçaments internacionals són la font principal d'emissions associades al futbol professional, especialment en competicions europees com la UEFA Champions League. Els viatges d'equips, staff tècnic i aficionats generen una petjada de CO<sub>2</sub> molt elevada, i optimitzar la distribució geogràfica dels enfrontaments pot reduir-la de manera significativa.

En aquest context, no té sentit ambientalment ni logísticament programar partits com, per exemple, un Real Madrid (Espanya) – Kairat Almaty (Kazakhstan) en la fase de lliga. Aquest tipus de desplaçaments, de més de 6.000 km, impliquen emissions desproporcionades respecte al valor esportiu o econòmic del partit, especialment quan existeixen alternatives d'enfrontaments regionals amb distàncies molt inferiors.

Algunes de les competicions esportives més importants del món ja han començat a introduir criteris de proximitat geogràfica o eficiència de viatges per reduir emissions. Alguns exemples són la *NBA*, la *MLB* o la *Fórmula 1*.

La *NBA* (National Basketball Association), des de la temporada 2023, ha adaptat parcialment el calendari agrupant partits consecutius contra equips de la mateixa regió (mini-series) per minimitzar vols interiors i desplaçaments llargs. Aquesta mesura, tot i que motivada principalment per reduir la fatiga dels jugadors, també ha contribuït a disminuir les emissions totals de CO<sub>2</sub> associades als viatges.

La *MLB* (Major League Baseball) utilitza models de planificació logística per reduir els quilòmetres totals recorreguts pels equips en una temporada completa, mantenint les restriccions tradicionals de la competició (equilibri d'enfrontaments, horaris televisius, etc.).

La *Fórmula 1* ha estat una de les primeres competicions globals a incorporar criteris de sostenibilitat en la planificació del calendari. Des del 2023, s'ha començat a reagrupar els Grans Premis per continents (per exemple, celebrant els circuits d'Orient Mitjà seguits abans dels europeus) amb l'objectiu de reduir la logística aèria i marítima. Segons la pròpia FIA, aquest nou calendari podria reduir fins a un 30% de les emissions logístiques anuals.

En altres esports com el rugbi internacional o l'Eurolliga de bàsquet, també s'han fet proves pilot d'agrupament regional de partits per evitar viatges intercontinentals o de molt llarg recorregut.

Per a fer aquesta part hem llegit diversos articles que s'adjunten al final de treball a la secció de Bibliografia.

# Modelització matemàtica

## Variables generals del problema

$N = 36$	nombre total d'equips
$P = \{1, 2, 3, 4\}$	conjunt de pots
$M = 8$	nombre de partits que juga cada equip
$mL = 4$	nombre de partits que juga cada equip com a local
$mP = 2$	màxim de partits que pot jugar contra un rival del mateix pot

## Informació dels equips ( $i$ )

- $P(i)$ : pot al qual pertany l'equip  $i$ .
- $C(i)$ : país o federació al qual pertany l'equip  $i$ .
- $\text{Co}_i = (x_i, y_i)$ : coordenades geogràfiques de l'estadi de l'equip  $i$ .

## Representació del problema

Representarem el nostre problema amb dues matrius; la matriu de partits i la matriu de distàncies.

La **matriu de partits**  $X = [x_{ij}]$  és una matriu quadrada de mida  $N \times N$ , on  $N$  és el nombre total d'equips de la competició.

- Cada **fila** representa els partits que un equip juga com a **visitant**.
- Cada **columna** representa els partits que un equip juga com a **local**.

L'element  $x_{ij}$  es defineix com:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'equip } i \text{ juga al camp de l'equip } j, \\ 0 & \text{altrament.} \end{cases}$$

La diagonal de la matriu conté sempre zeros, ja que cap equip juga contra ell mateix:

$$x_{ii} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N$$

Per facilitar el control de les restriccions, hem ordenat els equips segons el seu pot de classificació: primer els del Pot 1, després els del Pot 2, el Pot 3 i finalment el Pot 4.

La **matriu de distàncies**  $D = [d_{ij}]$  també és una matriu quadrada  $N \times N$ , on cada element conté la distància geogràfica entre la ciutat de l'equip  $i$  i la ciutat de l'equip  $j$ .

$$d_{ij} = \text{distància entre les ciutats dels equips } i \text{ i } j$$

Aquesta matriu compleix les següents propietats:

$$d_{ij} = d_{ji} \quad (\text{simètrica})$$

$$d_{ii} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N$$

La matriu  $D$  no depèn de les decisions de programació: és un **paràmetre fix** que es multiplica per les variables de la matriu de partits  $X$  per calcular la distància total recorreguda pels equips.

## Funció Objectiu: Minimitzar la distància total recorreguda pels equips

L'objectiu del nostre model és reduir al màxim la distància que han de recórrer tots els equips, ja que això disminueix el consum de combustible i les emissions de CO<sub>2</sub>.

Cada variable  $x_{ij}$  indica si l'equip  $i$  visita l'equip  $j$ , i cada distància  $d_{ij}$  és la distància geogràfica entre els estadis de  $i$  i  $j$ .

La funció objectiu es defineix com la suma de totes les distàncies dels partits que es juguen:

$$\text{Minimitzar } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} \cdot x_{ij}$$

### Interpretació:

- Si  $x_{ij} = 1$ , aquell partit es disputa i per tant la distància  $d_{ij}$  s'afegeix al total.
- Si  $x_{ij} = 0$ , no s'afegeix res.

La suma de tots aquests productes dóna la distància total recorreguda per tots els equips.

## Restriccions

### 1. Nombre total de partits per equip

Cada equip  $i$  ha de disputar un total de 8 partits, comptant els partits com a visitant i com a local:

$$\underbrace{\sum_{j=1}^N x_{ij}}_{\text{com a visitant}} + \underbrace{\sum_{j=1}^N x_{ji}}_{\text{com a local}} = 8 \quad \forall i = 1, \dots, N$$

De manera conceptual, la suma dels elements de la fila  $i$  de la columna corresponents a cada equip ha de ser igual a 8.

### 2. Repartiment de partits a casa i fora

Cada equip ha de jugar exactament 4 partits com a local i 4 com a visitant:

$$\sum_{j=1}^N x_{ji} = 4 \quad \forall i \quad \text{ i } \quad \sum_{j=1}^N x_{ij} = 4 \quad \forall i$$

De manera conceptual, la suma de cada fila ha de ser 4 i la suma de cada columna també ha de ser 4.

### 3. Diversitat de pots

Cada equip s'ha d'enfrontar a **2 equips de cada pot**, incloent el seu propi pot. Per tal de representar millor les relacions entre els equips segons el seu pot, subdividim la matriu original  $X$  en una estructura de blocs.

Aquesta matriu es descompon en  $4 \times 4 = 16$  blocs de mida  $9 \times 9$ , on cada bloc agrupa els enfrontaments entre equips de dos pots determinats.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & X_{34} \\ X_{41} & X_{42} & X_{43} & X_{44} \end{bmatrix}$$

Cada bloc  $X_{pq}$ , amb  $p, q \in \{1, 2, 3, 4\}$ , representa els partits entre els equips del *Pot p* i els del *Pot q*. Així, la matriu queda ordenada de manera que els equips del mateix pot ocupen files i columnes consecutives, facilitant el control de les restriccions de competició.

Cada submatriu  $X_{pq}$  és de mida  $9 \times 9$  i té la forma següent:

$$X_{pq} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^{(pq)} & x_{1,2}^{(pq)} & \cdots & x_{1,9}^{(pq)} \\ x_{2,1}^{(pq)} & x_{2,2}^{(pq)} & \cdots & x_{2,9}^{(pq)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{9,1}^{(pq)} & x_{9,2}^{(pq)} & \cdots & x_{9,9}^{(pq)} \end{bmatrix}$$

Dins de cada bloc, s'imposa que cada equip jugui exactament un partit contra un rival de cada pot. Això es tradueix en les condicions següents:

$$\sum_{j=1}^9 x_{ij}^{(pq)} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, 9$$

$$\sum_{i=1}^9 x_{ij}^{(pq)} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, 9$$

### 4. Un únic enfrontament entre cada parella d'equips

Dos equips no poden jugar més d'un cop entre ells:

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall i \neq j$$

Aquesta condició evita partits duplicitats.

### 5. Restricció per país

Els equips del mateix país no poden enfrontar-se entre ells:

$$x_{ij} = 0 \quad \text{si } \text{country}(i) = \text{country}(j)$$

Aquesta norma assegura la diversitat geogràfica en cada grup de la competició.

## Anàlisi teòrica: viabilitat, limitacions i implicacions

Des del punt de vista teòric, el model és plenament viable. Les restriccions definides, com el fet que cada equip jugui vuit partits (quatre com a local i quatre com a visitant), que s'enfronti a dos rivals de cada pot i que no coincideixi amb equips del mateix país, són consistentes entre elles i reflecteixen amb precisió les regles oficials del torneig.

A més, la pròpia organització de la UEFA ja estructura els pots de manera que facilita la factibilitat del sorteig: habitualment hi ha un màxim de quatre o cinc equips per país (en els països que n'hi ha més), repartits en pots diferents, cosa que redueix molt el risc d'incompatibilitats. Aquesta distribució prèvia garanteix que cada equip tingui prou opcions de rivals vàlids en cada pot.

Tot i això, el model presenta limitacions que cal tenir en compte. En primer lloc, és un problema combinatori complex: a mesura que augmenta el nombre d'equips, el nombre de possibles combinacions creix exponencialment, i això pot fer que la cerca de la solució òptima sigui costosa computacionalment. Tot i la bona estructura inicial dels pots, la incorporació de restriccions addicionals com distàncies mínimes o màximes, rotacions de jornades o condicions mediambientals més fines pot incrementar significativament la dificultat del problema.

En segon lloc, el model assumeix que totes les distàncies  $d_{ij}$  són conegeudes i comparables, però en la realitat hi pot haver variacions per factors com la disponibilitat d'aeroports, connexions directes o logística local. Això pot fer que la solució teòrica òptima no sigui exactament la més eficient en la pràctica.

Pel que fa a les implicacions, el model mostra que és perfectament possible introduir criteris de sostenibilitat dins d'un sistema tan complex com la Champions League sense alterar la seva essència esportiva. Reduir les distàncies totals pot comportar una disminució real de les emissions de CO<sub>2</sub>, amb un impacte positiu en la imatge institucional i mediambiental de la competició.

Tot i així, cal reconèixer que l'aplicació d'un model d'optimització com aquest podria reduir l'emoció i la imprevisibilitat pròpia del sorteig tradicional, ja que els criteris de proximitat geogràfica farien que molts enfrontaments es repetissin any rere any, disminuint part de l'interès i la sorpresa que caracteritzen la competició.

## Implementació computacional

Per a la resolució del model matemàtic proposat, s'ha desenvolupat un algorisme en llenguatge **Python** i la llibreria **Pulp**. L'estructura del codi es basa en tres etapes principals:

1. **Càrrega de dades:** Lectura d'un fitxer Excel amb la informació dels 36 equips, assignació de pots i obtenció de coordenades geogràfiques.
2. **Càcul de distàncies:** Generació automàtica de la matriu de distàncies  $D_{ij}$  utilitzant la fórmula de Haversine per calcular la distància geodèsica entre estadis.
3. **Optimització:** Execució del model de programació lineal per trobar la matriu de partits  $X_{ij}$  que minimitza la funció objectiu  $Z$ , respectant totes les restriccions descrites anteriorment (partits per pot, país i localitat).

## Anàlisi de resultats i discussió

L'estudi de les distàncies totals recorregudes pels equips com a visitants mostra diferències importants entre la situació actual i els escenaris alternatius. Actualment, els equips han recorregut un total de 241.947 quilòmetres en trajectes aeris.

Mitjançant python, hem estudiat els possibles escenaris i hem vist que si s'optimitzessin els desplaçaments, la distància mínima possible seria de 192.114 quilòmetres. Això implicaria un estalvi de 49.833 quilòmetres, equivalent a una reducció aproximada del 20,6% respecte de la distància actual.

En canvi, en el pitjor escenari possible, amb una planificació completament ineficient, la distància total podria arribar fins als 282.927 quilòmetres.

Com podem veure a la figura 1 la situació actual es troba en un punt intermig, però amb un marge de millora molt considerable tant des del punt de vista logístic com ambiental.



Figura 1: Distància real, distància màxima i distància mínima.

## Impacte ambiental dels vols privats

En aquest apartat, ens centrarem en l'impacte ambiental associat als vols privats, especialment pel que fa a les emissions de CO<sub>2</sub> generades per aquests desplaçaments aeris. Els vols privats són molt més contaminants que els comercials, ja que transporten menys passatgers per trajecte i tenen un consum de combustible molt superior per persona. Segons dades de l'Agència Europea del Medi Ambient (EEA), un vol privat emet de mitjana 1,8 kg de CO per passatger i per quilòmetre.

Si suposem que cada desplaçament es fa amb un avió privat amb 45 ocupants (jugadors, tècnics i personal de l'equip), podem calcular les emissions totals de la manera següent:

**Situació actual (241.947 km):**

$$241.947,23 \times 45 \times 1,8 = 19.791.028 \text{ kg de CO}_2, \quad \text{és a dir, unes 19.791 tones de CO}_2.$$

**Situació òptima (192.114 km):**

$$192.114 \times 45 \times 1,8 = 15.545.196 \text{ kg de CO}_2, \quad \text{és a dir, 15.545 tones de CO}_2.$$

**Diferència estalviada:**

4.246 tones de CO<sub>2</sub> menys si s'optimitzen els desplaçaments.

Per posar aquesta xifra en context, estalviar 4.246 tones de CO equival aproximadament a eliminar les emissions anuals de més de 900 cotxes particulars, o al consum elèctric anual d'unes 700 llars mitjanes.

És, per tant, un estalvi ambiental de gran magnitud, especialment si considerem que aquestes emissions provenen exclusivament dels desplaçaments aeris dels equips.

## Treball futur

En el futbol professional, el calendari de competicions és cada vegada més exigent, amb un augment constant del nombre de partits tant a nivell nacional com internacional i hem volgut veure què passaria amb els desplaçaments quan augmentem el nombre de partits.

Nosaltes hem decidit estudiar 3 casos, el Cas 1 que és el cas base, el Cas 2 on cada equip disputa 16 partits on hem ajustat el nombre màxim de rivals del mateix país a 6 i el nombre de partits contra rivals del mateix pot a 4 per a que el model sigui viable. Finalment, hem estudiat el Cas 3 on cada equip disputa 24 partits i nombre màxim de rivals del mateix país és 6 i el nombre de rivals del mateix pot ésser 6.

L'anàlisi de les distàncies recorregudes pels equips com a visitants mostra que, a mesura que augmenta el nombre de partits, la distància total creix de manera molt significativa.

En el **Cas 1**, la distància oscil·la entre 192.114 quilòmetres i 282.927 quilòmetres. En el **Cas 2**, la distància oscil·la entre 408.882 quilòmetres i 554.671 quilòmetres. En el **Cas 3** (24 partits), la distància oscil·la entre 665.919 quilòmetres i 789.893 quilòmetres.

Com podem veure a la Figura 2, això representa un increment gairebé lineal en quilòmetres totals, però amb una distància mitjana per partit lleugerament creixent, ja que a mesura que s'amplia el calendari s'han d'incloure rivals més llunyans i es redueix la possibilitat d'agrupar desplaçaments regionals.

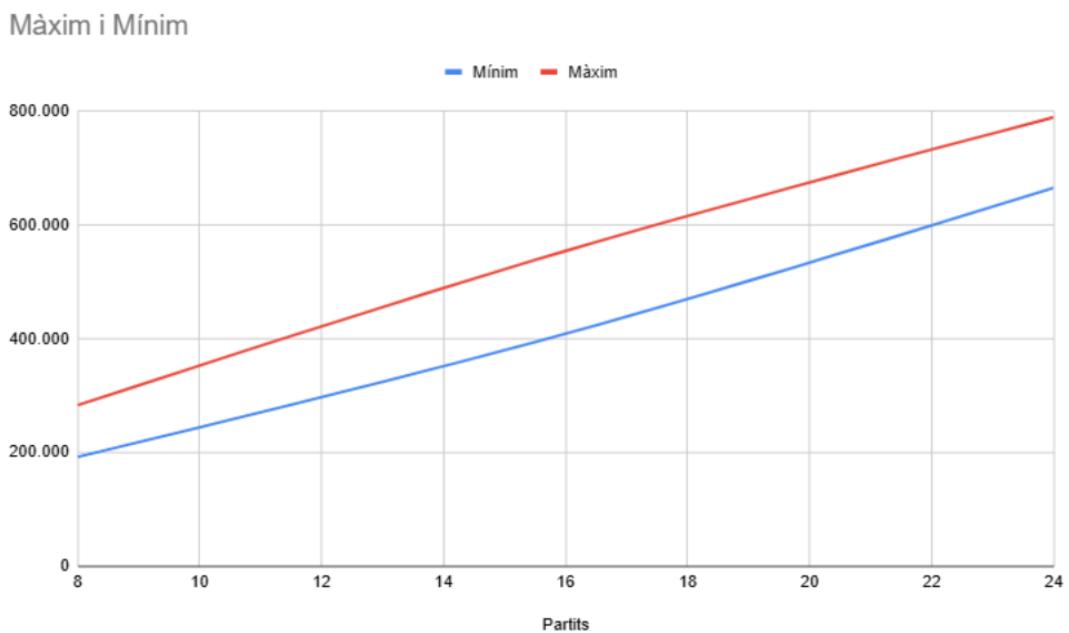


Figura 2: Augment de distància respecte al nombre de partits.

Des del punt de vista ambiental, l'impacte és molt elevat. Considerant vols privats de 45 persones i una emissió mitjana de 1,8 kg de CO<sub>2</sub> per passatger i quilòmetre, les emissions totals passen de 15.500 tones en el millor cas del primer escenari a més de 63.000 tones en el pitjor del tercer. Aquesta diferència mostra que cada grup addicional de partits afegeix milers de tones de CO<sub>2</sub>, un impacte difícil de justificar en termes de sostenibilitat.

També el cost econòmic escala de manera alarmant. Amb un preu estimat de 60–80 € per quilòmetre, el cost total passa d'entre 11 i 22 milions d'euros en el primer cas fins a més de 60 milions d'euros en el tercer. Això evidencia que augmentar partits no només incrementa les emissions, sinó que pot posar en risc la viabilitat econòmica de clubs amb pressupostos limitats.

En resum, l'escalat dels partits comporta un augment desproporcionat de distàncies, emissions i costos que no tindria sentit tenint també en compte l'augment de les lesions que hi està havent últimament degut a l'elevat nombre de partits.

## Calendaris proposats

### Cas 1: 8 partits

Equip	Visitant	Local
FC Barcelona	Manchester City, Juventus, Olympique Marseille, Pafos	Inter Milan, Arsenal, Olympiacos, Galatasaray
Bayern Munich	Chelsea, Atalanta, Olympiacos, Galatasaray	Liverpool, Juventus, Slavia Praga, Qarabag
Liverpool	Bayern Munich, Bayer Leverkusen, Bodo Glimt, Kairat	Real Madrid, Benfica, Ajax, Athletic Club
Real Madrid	Liverpool, Benfica, Sporting CP, Newcastle	PSG, Atalanta, Napoli, Monaco
PSG	Real Madrid, Brugge, PSV, Union SG	Borussia Dortmund, Atlético de Madrid, Tottenham, Newcastle
Inter Milan	FC Barcelona, Atletico de Madrid, Tottenham, Monaco	Chelsea, Frankfurt, Sporting CP, Pafos
Borussia Dortmund	PSG, Arsenal, Ajax, Copenhagen	Manchester City, Brugge, PSV, Kairat
Chelsea	Inter Milan, Frankfurt, Napoli, Athletic Club	Bayern Munich, Villarreal, Olympique Marseille, Union SG
Manchester City	Borussia Dortmund, Villarreal, Slavia Praga, Qarabag	FC Barcelona, Bayer Leverkusen, Bodo Glimt, Copenhagen
Arsenal	FC Barcelona, Brugge, PSV, Kairat	Borussia Dortmund, Frankfurt, Slavia Praga, Qarabag
Bayer Leverkusen	Manchester City, Villarreal, Ajax, Union SG	Liverpool, Brugge, Bodo Glimt, Copenhagen

Equip	Visitant	Local
Atletico de Madrid	PSG, Atalanta, Sporting CP, Newcastle	Inter Milan, Benfica, Tottenham, Union SG
Benfica	Liverpool, Atletico de Madrid, Napoli, Monaco	Real Madrid, Juventus, Olympique Marseille, Newcastle
Atalanta	Real Madrid, Frankfurt, Slavia Praga, Qarabag	Bayern Munich, Atletico de Madrid, Olympiacos, Galatasaray
Villarreal	Chelsea, Juventus, Olympiacos, Galatasaray	Manchester City, Bayer Leverkusen, Napoli, Pafos
Juventus	Bayern Munich, Benfica, Olympique Marseille, Pafos	FC Barcelona, Villarreal, Sporting CP, Monaco
Frankfurt	Inter Milan, Arsenal, Bodo Glimt, Athletic Club	Chelsea, Atalanta, PSV, Kairat
Brugge	Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Tottenham, Copenhaguen	PSG, Arsenal, Ajax, Athletic Club
Tottenham	PSG, Atletico de Madrid, Sporting CP, Union SG	Inter Milan, Brugge, PSV, Monaco
PSV	Borussia Dortmund, Frankfurt, Tottenham, Athletic Club	PSG, Arsenal, Bodo Glimt, Union SG
Ajax	Liverpool, Brugge, Bodo Glimt, Newcastle	Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Slavia Praga, Copenhaguen
Napoli	Real Madrid, Villarreal, Olympiacos, Qarabag	Chelsea, Benfica, Olympique Marseille, Galatasaray
Sporting CP	Inter Milan, Juventus, Olympique Marseille, Monaco	Real Madrid, Atletico de Madrid, Tottenham, Newcastle
Olympiacos	FC Barcelona, Atalanta, Slavia Praga, Galatasaray	Bayern Munich, Villarreal, Napoli, Pafos
Slavia Praga	Bayern Munich, Arsenal, Ajax, Kairat	Manchester City, Atalanta, Olympiacos, Qarabag
Bodo Glimt	Manchester City, Bayer Leverkusen, PSV, Copenhaguen	Liverpool, Frankfurt, Ajax, Kairat
Olympique Marseille	Chelsea, Benfica, Napoli, Pafos	FC Barcelona, Juventus, Sporting CP, Athletic Club
Copenhaguen	Manchester City, Bayer Leverkusen, Ajax, Union SG	Borussia Dortmund, Brugge, Bodo Glimt, Newcastle
Monaco	Real Madrid, Juventus, Tottenham, Newcastle	Inter Milan, Benfica, Sporting CP, Athletic Club
Galatasaray	FC Barcelona, Atalanta, Napoli, Kairat	Bayern Munich, Villarreal, Olympiacos, Pafos

Equip	Visitant	Local
Union SG	Chelsea, Atletico de Madrid, PSV, Athletic Club	PSG, Bayer Leverkusen, Tottenham, Copenhaguen
Qarabag	Bayern Munich, Arsenal, Slavia Praga, Pafos	Manchester City, Atalanta, Napoli, Kairat
Athletic Club	Liverpool, Brugge, Olympique Marseille, Monaco	Chelsea, Frankfurt, PSV, Union SG
Newcastle	PSG, Benfica, Sporting CP, Copenhaguen	Real Madrid, Atletico de Madrid, Ajax, Monaco
Pafos	Inter Milan, Villarreal, Olympiacos, Galatasaray	FC Barcelona, Juventus, Olympique Marseille, Qarabag
Kairat	Borussia Dortmund, Frankfurt, Bodo Glimt, Qarabag	Liverpool, Arsenal, Slavia Praga, Galatasaray

## Cas 2: 16 partits

Equip	Visitant	Local
FC Barcelona	Bayern Munich, Inter Milan, Juventus, Frankfurt, Tottenham, Olympique Marseille, Monaco, Newcastle	Borussia Dortmund, Chelsea, Arsenal, Atalanta, Napoli, Olympiacos, Galatasaray, Pafos
Bayern Munich	Liverpool, Manchester City, Atalanta, Villarreal, Tottenham, Napoli, Galatasaray, Pafos	FC Barcelona, Inter Milan, Arsenal, Juventus, Olympiacos, Slavia Praga, Qarabag, Kairat
Liverpool	PSG, Borussia Dortmund, Atletico de Madrid, Villarreal, PSV, Sporting CP, Qarabag, Athletic Club	Bayern Munich, Real Madrid, Bayer Leverkusen, Benfica, Ajax, Bodo Glimt, Copenhaguen, Kairat
Real Madrid	Liverpool, Chelsea, Benfica, Juventus, Olympiacos, Olympique Marseille, Union SG, Pafos	PSG, Manchester City, Atalanta, Brugge, Napoli, Sporting CP, Monaco, Newcastle
PSG	Real Madrid, Chelsea, Benfica, Brugge, Ajax, Sporting CP, Copenhaguen, Union SG	Liverpool, Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Atletico de Madrid, Tottenham, PSV, Athletic Club, Newcastle
Inter Milan	Bayern Munich, Manchester City, Arsenal, Atletico de Madrid, Olympiacos, Slavia Praga, Monaco, Galatasaray	FC Barcelona, Chelsea, Villarreal, Frankfurt, Tottenham, Olympique Marseille, Athletic Club, Pafos

Equip	Visitant	Local
Borussia Dortmund	FC Barcelona, PSG, Arsenal, Atalanta, PSV, Ajax, Newcastle, Kairat	Liverpool, Manchester City, Juventus, Brugge, Slavia Praga, Bodo Glimt, Copenhaguen, Union SG
Chelsea	FC Barcelona, Inter Milan, Bayer Leverkusen, Brugge, Napoli, Bodo Glimt, Qarabag, Athletic Club	Real Madrid, PSG, Villarreal, Frankfurt, PSV, Olympique Marseille, Monaco, Union SG
Manchester City	Real Madrid, Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Frankfurt, Slavia Praga, Bodo Glimt, Copenhaguen, Kairat	Bayern Munich, Inter Milan, Atletico de Madrid, Benfica, Ajax, Sporting CP, Galatasaray, Qarabag
Arsenal	FC Barcelona, Bayern Munich, Villarreal, Brugge, Napoli, Slavia Praga, Copenhaguen, Kairat	Inter Milan, Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Frankfurt, PSV, Sporting CP, Union SG, Athletic Club
Bayer Leverkusen	Liverpool, PSG, Arsenal, Brugge, Ajax, Bodo Glimt, Union SG, Athletic Club	Chelsea, Manchester City, Atletico de Madrid, Atalanta, PSV, Slavia Praga, Copenhaguen, Kairat
Atletico de Madrid	PSG, Manchester City, Bayer Leverkusen, Benfica, Tottenham, Sporting CP, Union SG, Newcastle	Liverpool, Inter Milan, Atalanta, Juventus, Napoli, Olympiacos, Galatasaray, Pafos
Benfica	Liverpool, Manchester City, Villarreal, Juventus, Napoli, Olympique Marseille, Monaco, Athletic Club	Real Madrid, PSG, Atletico de Madrid, Brugge, Tottenham, Ajax, Union SG, Newcastle
Atalanta	FC Barcelona, Real Madrid, Bayer Leverkusen, Atletico de Madrid, Slavia Praga, Bodo Glimt, Monaco, Pafos	Bayern Munich, Borussia Dortmund, Villarreal, Frankfurt, Olympiacos, Olympique Marseille, Galatasaray, Qarabag
Villarreal	Inter Milan, Chelsea, Atalanta, Juventus, Sporting CP, Olympiacos, Galatasaray, Pafos	Bayern Munich, Liverpool, Arsenal, Benfica, Napoli, Olympique Marseille, Monaco, Qarabag
Juventus	Bayern Munich, Borussia Dortmund, Atletico de Madrid, Frankfurt, Olympiacos, Olympique Marseille, Galatasaray, Qarabag	FC Barcelona, Real Madrid, Benfica, Villarreal, Tottenham, Sporting CP, Monaco, Pafos

Equip	Visitant	Local
Frankfurt	Inter Milan, Chelsea, Arsenal, Atalanta, PSV, Ajax, Copenhaguen, Qarabag	FC Barcelona, Manchester City, Juventus, Brugge, Slavia Praga, Bodo Glimt, Newcastle, Kairat
Brugge	Real Madrid, Borussia Dortmund, Benfica, Frankfurt, Tottenham, PSV, Newcastle, Kairat	PSG, Chelsea, Arsenal, Bayer Leverkusen, Ajax, Bodo Glimt, Copenhaguen, Athletic Club
Tottenham	PSG, Inter Milan, Benfica, Juventus, PSV, Ajax, Monaco, Kairat	FC Barcelona, Bayern Munich, Atletico de Madrid, Brugge, Napoli, Olympique Marseille, Union SG, Pafos
PSV	PSG, Chelsea, Arsenal, Bayer Leverkusen, Slavia Praga, Bodo Glimt, Copenhaguen, Union SG	Liverpool, Borussia Dortmund, Frankfurt, Brugge, Tottenham, Sporting CP, Monaco, Athletic Club
Ajax	Liverpool, Manchester City, Benfica, Brugge, Sporting CP, Slavia Praga, Copenhaguen, Newcastle	PSG, Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Frankfurt, Tottenham, Bodo Glimt, Union SG, Athletic Club
Napoli	FC Barcelona, Real Madrid, Atletico de Madrid, Villarreal, Tottenham, Olympique Marseille, Monaco, Pafos	Bayern Munich, Chelsea, Arsenal, Benfica, Sporting CP, Olympiacos, Galatasaray, Qarabag
Sporting CP	Real Madrid, Manchester City, Arsenal, Juventus, PSV, Napoli, Union SG, Athletic Club	Liverpool, PSG, Atletico de Madrid, Villarreal, Ajax, Olympique Marseille, Monaco, Newcastle
Olympiacos	FC Barcelona, Bayern Munich, Atletico de Madrid, Atalanta, Napoli, Olympique Marseille, Galatasaray, Qarabag	Real Madrid, Inter Milan, Villarreal, Juventus, Slavia Praga, Bodo Glimt, Pafos, Kairat
Slavia Praga	Bayern Munich, Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Frankfurt, Olympiacos, Bodo Glimt, Galatasaray, Qarabag	Inter Milan, Manchester City, Arsenal, Atalanta, PSV, Ajax, Copenhaguen, Kairat
Bodo Glimt	Liverpool, Borussia Dortmund, Frankfurt, Brugge, Ajax, Olympiacos, Newcastle, Kairat	Chelsea, Manchester City, Bayer Leverkusen, Atalanta, PSV, Slavia Praga, Copenhaguen, Qarabag

Equip	Visitant	Local
Olympique Marseille	Inter Milan, Chelsea, Atalanta, Villarreal, Tottenham, Sporting CP, Athletic Club, Pafos	FC Barcelona, Real Madrid, Benfica, Juventus, Napoli, Olympiacos, Galatasaray, Newcastle
Copenhaguen	Liverpool, Borussia Dortmund, Bayer Leverkusen, Brugge, Slavia Praga, Bodo Glimt, Union SG, Qarabag	PSG, Manchester City, Arsenal, Frankfurt, PSV, Ajax, Newcastle, Kairat
Monaco	Real Madrid, Chelsea, Villarreal, Juventus, PSV, Sporting CP, Newcastle, Pafos	FC Barcelona, Inter Milan, Benfica, Atalanta, Tottenham, Napoli, Union SG, Athletic Club
Galatasaray	FC Barcelona, Manchester City, Atletico de Madrid, Atalanta, Napoli, Olympique Marseille, Qarabag, Athletic Club	Bayern Munich, Inter Milan, Villarreal, Juventus, Olympiacos, Slavia Praga, Pafos, Kairat
Union SG	Borussia Dortmund, Chelsea, Arsenal, Benfica, Tottenham, Ajax, Monaco, Newcastle	Real Madrid, PSG, Bayer Leverkusen, Atletico de Madrid, PSV, Sporting CP, Copenhaguen, Athletic Club
Qarabag	Bayern Munich, Manchester City, Atalanta, Villarreal, Napoli, Bodo Glimt, Pafos, Kairat	Liverpool, Chelsea, Juventus, Frankfurt, Olympiacos, Slavia Praga, Copenhaguen, Galatasaray
Athletic Club	PSG, Inter Milan, Arsenal, Brugge, PSV, Ajax, Monaco, Union SG	Liverpool, Chelsea, Bayer Leverkusen, Benfica, Sporting CP, Olympique Marseille, Galatasaray, Newcastle
Newcastle	Real Madrid, PSG, Benfica, Frankfurt, Sporting CP, Olympique Marseille, Copenhaguen, Athletic Club	FC Barcelona, Borussia Dortmund, Atletico de Madrid, Brugge, Ajax, Bodo Glimt, Monaco, Union SG
Pafos	FC Barcelona, Inter Milan, Atletico de Madrid, Juventus, Tottenham, Olympiacos, Galatasaray, Kairat	Bayern Munich, Real Madrid, Atalanta, Villarreal, Napoli, Olympique Marseille, Monaco, Qarabag
Kairat	Bayern Munich, Liverpool, Bayer Leverkusen, Frankfurt, Olympiacos, Slavia Praga, Copenhaguen, Galatasaray	Borussia Dortmund, Manchester City, Arsenal, Brugge, Tottenham, Bodo Glimt, Qarabag, Pafos

### Cas 3: 24 partits

Equip	Visitant	Local
FC Barcelona	Liverpool, PSG, Man City, Arsenal, Benfica, Atalanta, Tottenham, Sporting CP, O. Marseille, Monaco, Qarabag, Pafos	Bayern, Inter, Chelsea, B. Leverkusen, Juventus, Frankfurt, Napoli, Olympiacos, Slavia Praga, Galatasaray, Newcastle, Kairat
Bayern Munich	FC Barcelona, Liverpool, Inter, At. Madrid, Atalanta, Brugge, Napoli, Slavia Praga, O. Marseille, Galatasaray, Newcastle, Pafos	R. Madrid, Chelsea, Man City, Arsenal, Villarreal, Juventus, Tottenham, Olympiacos, Bodo/Glimt, Copenhagen, Qarabag, Kairat
Liverpool	B. Dortmund, B. Leverkusen, Villarreal, Frankfurt, Ajax, Sporting CP, Bodo/Glimt, Copenhagen, Athletic Club, Kairat, R. Madrid, Inter	FC Barcelona, Bayern, PSG, At. Madrid, Benfica, Brugge, PSV, Slavia Praga, O. Marseille, Monaco, Union SG, Qarabag
Real Madrid	Bayern, PSG, Chelsea, B. Leverkusen, Benfica, Juventus, Tottenham, Ajax, Napoli, Monaco, Union SG, Pafos	Liverpool, B. Dortmund, Man City, Arsenal, Atalanta, Frankfurt, Sporting CP, Olympiacos, O. Marseille, Galatasaray, Qarabag, Newcastle
PSG	R. Madrid, Chelsea, Man City, Arsenal, Villarreal, Juventus, Olympiacos, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Copenhagen, Union SG, Athletic Club	Liverpool, B. Dortmund, FC Barcelona, At. Madrid, Atalanta, Brugge, Tottenham, PSV, Ajax, Galatasaray, Newcastle, Kairat
Inter Milan	FC Barcelona, PSG, Arsenal, Atalanta, PSV, Ajax, Newcastle, Kairat, B. Dortmund, Benfica, Tottenham, Union SG	Bayern, Man City, At. Madrid, Villarreal, Brugge, Sporting CP, Bodo/Glimt, O. Marseille, Monaco, Slavia Praga, Olympiacos, Pafos
Man City	Bayern, R. Madrid, Inter, At. Madrid, Villarreal, Brugge, Ajax, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Monaco, Qarabag, Kairat	FC Barcelona, PSG, B. Dortmund, B. Leverkusen, Benfica, Frankfurt, PSV, Napoli, Sporting CP, Copenhagen, Union SG, Athletic Club

Equip	Visitant	Local
Borussia Dortmund	Liverpool, Man City, Arsenal, Juventus, Brugge, PSV, Napoli, Olympiacos, Galatasaray, Union SG, Newcastle, Inter	FC Barcelona, R. Madrid, Chelsea, B. Leverkusen, At. Madrid, Frankfurt, Tottenham, Ajax, Bodo/Glimt, Copenhagen, Athletic Club, Pafos
Chelsea	R. Madrid, Inter, B. Dortmund, B. Leverkusen, Juventus, Brugge, Ajax, Napoli, Bodo/Glimt, Monaco, Union SG, Pafos	FC Barcelona, Bayern, PSG, Benfica, Atalanta, Frankfurt, PSV, Sporting CP, O. Marseille, Copenhagen, Athletic Club, Kairat
Arsenal	R. Madrid, Inter, B. Dortmund, B. Leverkusen, Juventus, Brugge, Napoli, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Copenhagen, Union SG, Kairat	FC Barcelona, Chelsea, Man City, At. Madrid, Atalanta, Tottenham, PSV, Ajax, Copenhagen, Qarabag, Athletic Club, Pafos
Bayer Leverkusen	Liverpool, R. Madrid, Inter, Villarreal, Juventus, Brugge, Napoli, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Union SG, Newcastle, Kairat	FC Barcelona, Chelsea, Man City, Arsenal, At. Madrid, Atalanta, Tottenham, PSV, Ajax, Copenhagen, Qarabag, Athletic Club
Atletico de Madrid	Liverpool, PSG, B. Dortmund, Benfica, Juventus, Frankfurt, Ajax, Napoli, O. Marseille, Galatasaray, Union SG, Newcastle	Bayern, Inter, Man City, Arsenal, B. Leverkusen, Atalanta, Tottenham, Sporting CP, Olympiacos, Copenhagen, Monaco, Pafos
Benfica	Liverpool, Inter, Man City, Arsenal, Atalanta, Juventus, Ajax, Olympiacos, O. Marseille, Monaco, Athletic Club, Newcastle	FC Barcelona, R. Madrid, Chelsea, At. Madrid, Villarreal, Brugge, Tottenham, Napoli, Bodo/Glimt, Copenhagen, Union SG, Pafos
Atalanta	R. Madrid, PSG, B. Dortmund, At. Madrid, Villarreal, Brugge, PSV, Sporting CP, Bodo/Glimt, Qarabag, Athletic Club, Pafos	FC Barcelona, Bayern, Chelsea, B. Leverkusen, Benfica, Frankfurt, Olympiacos, Slavia Praga, O. Marseille, Monaco, Galatasaray, Kairat
Villarreal	Bayern, PSG, Inter, B. Leverkusen, Benfica, Frankfurt, Tottenham, Napoli, Slavia Praga, Monaco, Qarabag, Pafos	Liverpool, B. Dortmund, Man City, Arsenal, Atalanta, Juventus, Sporting CP, Olympiacos, O. Marseille, Galatasaray, Union SG, Newcastle

Equip	Visitant	Local
Juventus	FC Barcelona, Bayern, Chelsea, B. Leverkusen, Villarreal, Brugge, Tottenham, PSV, Olympiacos, Galatasaray, Pafos, Kairat	R. Madrid, PSG, B. Dortmund, At. Madrid, Benfica, Frankfurt, Sporting CP, Slavia Praga, O. Marseille, Monaco, Qarabag, Athletic Club
Frankfurt	FC Barcelona, R. Madrid, Man City, Arsenal, Atalanta, Juventus, Napoli, Olympiacos, Slavia Praga, Copenhagen, Union SG, Newcastle	Liverpool, Inter, Chelsea, At. Madrid, Villarreal, Brugge, PSV, Ajax, Bodo/Glimt, Galatasaray, Pafos, Kairat
Brugge	Liverpool, B. Dortmund, Chelsea, B. Leverkusen, Benfica, Frankfurt, Sporting CP, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Copenhagen, Galatasaray, Kairat	Bayern, PSG, Man City, Arsenal, Atalanta, Juventus, Tottenham, PSV, Ajax, Qarabag, Athletic Club, Newcastle
Tottenham	Bayern, PSG, Man City, Arsenal, Atalanta, Juventus, PSV, Ajax, Qarabag, Athletic Club, Newcastle, Pafos	FC Barcelona, R. Madrid, Inter, B. Leverkusen, Villarreal, Brugge, Napoli, Sporting CP, O. Marseille, Monaco, Union SG, Kairat
Sporting CP	R. Madrid, Inter, Man City, At. Madrid, Villarreal, Juventus, PSV, Napoli, Olympiacos, Monaco, Galatasaray, Union SG	FC Barcelona, Liverpool, Chelsea, Arsenal, Atalanta, Brugge, Tottenham, Ajax, O. Marseille, Athletic Club, Newcastle, Pafos
Olympiacos	FC Barcelona, Bayern, R. Madrid, At. Madrid, Atalanta, Villarreal, Ajax, Napoli, Bodo/Glimt, Copenhagen, Pafos, Kairat	PSG, Inter, B. Dortmund, Benfica, Juventus, Frankfurt, Sporting CP, Slavia Praga, O. Marseille, Monaco, Galatasaray, Qarabag
Slavia Praga	Bayern, B. Dortmund, B. Leverkusen, Frankfurt, Olympiacos, Bodo/Glimt, Galatasaray, Qarabag	Inter, Man City, Arsenal, Atalanta, PSV, Ajax, Copenhagen, Newcastle, Pafos, Kairat
Bodo Glimt	Bayern, PSG, Chelsea, B. Leverkusen, Benfica, Frankfurt, Tottenham, Ajax, Napoli, Qarabag, Newcastle, Kairat	Liverpool, B. Dortmund, Man City, Arsenal, Atalanta, Brugge, PSV, Olympiacos, Slavia Praga, Copenhagen, Galatasaray, Union SG
Olympique Marseille	Liverpool, R. Madrid, Inter, Atalanta, Villarreal, Juventus, Ajax, Sporting CP, Olympiacos, Union SG, Newcastle, Pafos	FC Barcelona, Bayern, Chelsea, Arsenal, At. Madrid, Benfica, Tottenham, PSV, Napoli, Galatasaray, Qarabag, Athletic Club

Equip	Visitant	Local
Copenhaguen	Bayern, PSG, Man City, Arsenal, At. Madrid, Benfica, Tottenham, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Union SG, Newcastle, Kairat	Liverpool, B. Dortmund, Chelsea, B. Leverkusen, Frankfurt, Brugge, PSV, Ajax, Olympiacos, Galatasaray, Qarabag, Athletic Club
Monaco	Liverpool, Inter, Chelsea, At. Madrid, Atalanta, Juventus, PSV, Napoli, Olympiacos, Union SG, Qarabag, Pafos	FC Barcelona, R. Madrid, Man City, Arsenal, Benfica, Villarreal, Tottenham, Ajax, Sporting CP, Galatasaray, Athletic Club, Newcastle
Galatasaray	FC Barcelona, R. Madrid, B. Dortmund, Atalanta, Villarreal, Frankfurt, Olympiacos, Bodo/Glimt, O. Marseille, Copenhagen, Monaco, Pafos	Bayern, PSG, Inter, At. Madrid, Juventus, Brugge, Napoli, Sporting CP, Slavia Praga, Qarabag, Athletic Club, Kairat
Union SG	Liverpool, Chelsea, Man City, B. Leverkusen, Benfica, Villarreal, Tottenham, Ajax, Bodo/Glimt, Athletic Club, Newcastle, Kairat	Real Madrid, PSG, B. Dortmund, Arsenal, At. Madrid, Frankfurt, PSV, Sporting CP, O. Marseille, Copenhagen, Monaco, Pafos
Qarabag	Bayern, Liverpool, R. Madrid, Arsenal, Juventus, Brugge, PSV, Olympiacos, O. Marseille, Copenhagen, Galatasaray, Kairat	FC Barcelona, Inter, Man City, B. Leverkusen, Atalanta, Villarreal, Napoli, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Monaco, Newcastle, Pafos
Athletic Club	PSG, Inter, Man City, Arsenal, Juventus, Brugge, PSV, Sporting CP, O. Marseille, Copenhagen, Monaco, Galatasaray	Liverpool, B. Dortmund, Chelsea, B. Leverkusen, Benfica, Atalanta, Tottenham, Ajax, Napoli, Union SG, Newcastle, Pafos
Newcastle	FC Barcelona, R. Madrid, B. Dortmund, B. Leverkusen, Villarreal, Brugge, Ajax, Sporting CP, Slavia Praga, Monaco, Qarabag, Athletic Club	Bayern, PSG, Inter, At. Madrid, Benfica, Frankfurt, PSV, Bodo/Glimt, O. Marseille, Copenhagen, Union SG, Kairat
Pafos	PSG, Inter, Chelsea, At. Madrid, Benfica, Frankfurt, Napoli, Sporting CP, Slavia Praga, Union SG, Qarabag, Athletic Club	FC Barcelona, Bayern, R. Madrid, Atalanta, Villarreal, Juventus, Tottenham, Olympiacos, O. Marseille, Monaco, Galatasaray, Kairat

Equip	Visitant	Local
Kairat	FC Barcelona, Bayern, B. Dortmund, B. Leverkusen, Atalanta, Frankfurt, Tottenham, Ajax, Napoli, Galatasaray, Newcastle, Pafos	Liverpool, Chelsea, Man City, Arsenal, Juventus, Brugge, Olympiacos, Slavia Praga, Bodo/Glimt, Copenhagen, Union SG, Qarabag

## Conclusions

L'anàlisi realitzada demostra que l'aplicació de tècniques d'optimització matemàtica a la logística de la UEFA Champions League no només és viable, sinó altament beneficiosa. Les dades obtingudes permeten extreure les següents conclusions principals:

- 1. Reducció significativa de la petjada de carboni:** En l'escenari estàndard de 8 partits (Cas 1), l'optimització permet reduir la distància total de 241.947 km (calendari real) a 192.114 km. Això suposa un estalvi de gairebé 50.000 km, evitant l'emissió de més de 4.200 tones de  $CO_2$  a l'atmosfera.
- 2. Impacte econòmic tangible:** Tenint en compte que el cost d'una hora de vol privat oscil·la entre els 4.000 i els 8.000 euros, la reducció de quilometratge es tradueix en un estalvi potencial de milions d'euros per al conjunt dels clubs participants. Aquests recursos es podrien redirigir cap al desenvolupament esportiu o la millora d'infraestructures.
- 3. Escalabilitat del problema:** L'estudi dels casos amb 16 i 24 partits evidencia que, sense optimització, l'impacte ambiental creix de manera lineal i alarmant. Això reforça la necessitat d'implementar aquests sistemes especialment si la tendència del futbol modern és augmentar la càrrega de partits.

En definitiva, aquest projecte confirma que és possible compatibilitzar l'espectacle de la màxima competició europea amb la responsabilitat mediambiental. L'optimització logística es presenta no només com una millora tècnica, sinó com una **decisió estratègica intel·ligent** que millora la imatge pública de la competició i la seva sostenibilitat a llarg termini.

## Bibliografia

Article F1: <https://www.formula1.com/en/latest/article/explained-how-formula-1-has-cut-its-carbon-footprint-by-26.4hWrySuBvCXVfGah6hIMRL>

Article NBA: [https://www.lemonde.fr/en/sports/article/2022/08/24/the-nba-takes-action-to-reduce-its-carbon-footprint\\_59946119.html](https://www.lemonde.fr/en/sports/article/2022/08/24/the-nba-takes-action-to-reduce-its-carbon-footprint_59946119.html)

Article NFL-NHL: <https://www.sustainability-times.com/impact/study-sports-can-lower-its-emissions-with-covid-strategies/>