

Pol·lució i restriccions a la mobilitat a Catalunya: Un experiment natural basat en la COVID-19

Miquel-Àngel Garcia-López

Universitat Autònoma de Barcelona and Institut d'Economia de Barcelona

Hugo Carpena Barranco

Universitat Autònoma de Barcelona

RESUM

Aquest treball investiga l'impacte que té la mobilitat sobre la pol·lució als municipis de Catalunya. Per fer-ho, fem ús de l'experiment natural que representa la pandèmia de la COVID-19 per avaluar fins a quin punt es poden reduir els nivells de pol·lució quan s'estableixen restriccions a la mobilitat i la tecnologia no canvia. Gràcies a l'ús de dades amb un elevat detall temporal, analitzem també els impactes durant els diferents subperíodes de la pandèmia (primera onada, nova normalitat i segona i tercera onades) i a cadascuna de les hores del dia. En conjunt, els resultats d'aquestes anàlisis poden interpretar-se com una aproximació als possibles efectes de fenòmens cada cop més importants en la nostra vida com el teletreball o el comerç electrònic.

Classificació JEL: R41, Q53, L86

Paraules clau: pol·lució, restriccions, mobilitat, teletreball, covid19

1. Introducció

Segons l'**Organització Mundial de la Salut** (2022), la pol·lució de l'aire a les ciutats provoca la mort de 4,2 milions de persones cada any. Això suposa més que les morts causades pel VIH, la malària i la grip juntes. L'**Agència Europea del Medi Ambient** (2019) estima que, l'any 2016, només les emissions de $PM_{2.5}$ van causar 324.000 morts prematures a Europa i 24.100 a Espanya. En conjunt, almenys un tres per cent de la mortalitat anual d'Espanya és causada per la contaminació de l'aire (i aquesta és vuit

vegades superior a la mortalitat provocada per accidents de trànsit). A més de provocar morts prematures, la contaminació de l'aire també disminueix la qualitat de vida general de la població, amb un empitjorament de l'asma i les al·lèrgies, bronquitis en nens i un augment de les infeccions víriques.

Les emissions de contaminants atmosfèrics estan, en part, determinades per la mobilitat de les nostres ciutats. Segons la Comissió Europea, els desplaçaments en vehicles amb motors de gasolina i dièsel són responsables de

fins el 70% de les emissions de contaminants com els òxids de nitrogen (NO_x), les partícules en suspensió (PM) i el diòxid de sofre (SO_2), entre d'altres (**Comissió Europea, 2021**).

La mobilitat a les nostres ciutats depèn de com vivim, treballem i consumim en elles. Viure a prop o lluny de la feina o teletreballar, consumir productes locals o provinents de llocs llunyans, comprar en línia o de manera presencial són només alguns exemples de decisions que prenem i que afecten als nostres desplaçaments.

Davant de la creixent preocupació pels efectes de la pol·lució, les autoritats públiques han reaccionat amb la implementació de polítiques que tenen com a objectiu final la disminució dels contaminants atmosfèrics. La majoria d'aquestes polítiques actuen sobre la flota de vehicles i/o estableixen restriccions a la mobilitat. Així, per exemple, a nivell supranacional, la Unió Europea ha regulat els estàndards de qualitat de l'aire a les ciutats mitjançant el programa Clean Air for Europe i l'European Green Deal. A nivell nacional i regional, diferents països i regions han introduït les etiquetes mediambientals dels vehicles i han establert plans per renovar la flota de vehicles de combustió i incentivar la transició a vehicles elèctrics. A nivell més local, moltes ciutats estan implementant zones de baixes emissions i peatges de congestió, així com polítiques urbanístiques que prioritzen els espais de vianants per sobre del transport privat i afavoreixen el transport públic.

La literatura acadèmica recent ha aprofundit en l'estudi de la interrelació entre ciutats, mobilitat i pol·lució, tot destacant com la forma de les ciutats i les pautes de mobilitat condicionen la qualitat de l'aire i, per extensió, la salut pública.

Pel que fa a la forma urbana, diversos treballs

han examinat l'impacte de la densitat de població sobre la concentració de contaminants. **Carozzi and Roth (2023)** conclouen que un augment en la densitat urbana incrementa significativament els nivells de $\text{PM}_{2.5}$, amb implicacions quantificables sobre la mortalitat i els costos socials associats. De manera complementària, **Borck and Schrauth (2021)** mostren una correlació positiva entre densitat i concentració de NO_2 i PM_{10} . No obstant això, **Castells-Quintana, Dienesch, and Krause (2021)** apunten que, dins de les ciutats, la densificació pot reduir les emissions per càpita, especialment en contextos urbans policèntrics, matissant així els efectes globals de la densitat.

En relació amb la mobilitat i les polítiques públiques de regulació del trànsit, múltiples estudis han evidenciat l'efectivitat de mesures com els peatges de congestió i les zones de baixes emissions en la reducció del volum de vehicles, la congestió viària i la contaminació ambiental. Així, **Wolff (2014)** i **Malina and Scheffler (2015)** constaten reduccions substancials d'emissions a les àrees afectades per aquestes polítiques. Per contra, **Bernardo, Fageda, and Flores-Fillol (2021)** mostren que les zones de baixes emissions només són efectives en reduir la pol·lució, però no la congestió viària. Pel cas de Madrid, **Tassinari (2024)** mostra que la seva zona de baixes emissions efectivament redueix el trànsit a dins de l'àrea afectada, desplaçant-lo cap a altres àrees de la ciutat on acaba augmentant la congestió.

Aquest treball investiga l'impacte que té la mobilitat sobre la pol·lució als municipis de Catalunya. Per fer-ho, fem ús de l'experiment natural que representa la pandèmia de la COVID-19 per avaluar fins a quin punt es poden reduir els nivells de pol·lució quan s'estableixen restriccions a la mobilitat i la tecnologia no canvia. Gràcies a l'ús de dades amb un elevat detall

temporal, analitzem també els impactes durant els diferents subperíodes de la pandèmia (primera onada, nova normalitat i segona i tercera onades) i a cadascuna de les hores del dia. En conjunt, els resultats d'aquestes anàlisis poden interpretar-se com una aproximació als possibles efectes de fenòmens cada cop més importants en la nostra vida com el teletreball o el comerç electrònic.

La resta de l'article s'estructura en cinc seccions. A la **Secció 2** es descriuen les dades utilitzades i l'estratègia empírica adoptada. La **Secció 3** exposa els motius pels quals la pandèmia de la COVID-19 constitueix un escenari idoni per analitzar la relació entre mobilitat i contaminació atmosfèrica. A la **Secció 4** es presenten els principals resultats de l'estudi. Finalment, la Secció 5 recull les conclusions més rellevants derivades de l'anàlisi.

2. Estratègia empírica

2.1 Dades

La nostra base de dades inclou informació sobre 54 municipis de Catalunya desagregada per a les 24 hores del dia i els dies laborables de la setmana del període comprès entre el 14 de febrer de 2020 i el 31 de desembre de 2022. Aquest període inclou el de la pandèmia de la COVID-19 definida entre l'inici del primer estat d'alarma a Espanya el 14 de març de 2020 i la finalització del tercer estat d'alarma el 8 de maig de 2021.

Pol·lució

En aquest estudi ens centrem en 4 contaminants atmosfèrics. En primer lloc, els òxids de nitrogen primaris (NO_x) es generen principalment en processos de combustió associats al trànsit, especialment pels vehicles amb motor

dièsel, i el transport en general, així com per instal·lacions industrials d'alta temperatura i plantes de generació d'energia.

Segon, considerem dos tipus de partícules en suspensió o aerosols atmosfèrics, el PM_{10} i el $\text{PM}_{2.5}$. El seu origen pot ser primari o secundari. L'origen primari es produeix quan les partícules s'emeten directament a l'atmosfera, ja sigui de forma natural, com ara pols i partícules del sòl, sal marina, espores i pol·len, o de forma artificial com a conseqüència de l'acció humana i, en particular, del trànsit rodat i la circulació de vehicles, de processos de combustió industrials o de la calefacció d'edificis i habitatges, entre d'altres. L'origen secundari es produeix per reaccions químiques a l'atmosfera de gasos precursors (SO_2 , NO_x , NH_3 , etc.) i representa entre el 40% i el 70% del total de les partícules en suspensió.

Per últim, el diòxid de sofre (SO_2) es produeix durant la combustió de combustibles fòssils que contenen sofre (com el petroli i els combustibles sòlids), principalment en processos industrials d'alta temperatura i generació d'energia. L'emissor primari de SO_2 és el sector industrial.

La informació sobre aquests contaminants prové de Air Quality e-Reporting (abans AirBase), la base de dades sobre la qualitat de l'aire a Europa que proporciona l'Agència Europea de Medi Ambient. Consisteix en dades de mesurament de la qualitat de l'aire i estadístiques de diversos contaminants atmosfèrics entre 1969 i 2021. Pel conjunt d'Europa la informació es proporciona a nivell d'estació per a les 24 hores del dia i els 365 dies de l'any.

Meteorologia, demografia i estructura econòmica

L'emissió de contaminants atmosfèrics està molt influenciada per les condicions meteorològiques.

lògiques i climatològiques. Per controlar pels seus efectes, la nostra base de dades inclou variables calculades a nivell municipal i diari com la temperatura, les precipitacions, la humitat, i les hores de sol a partir de mesures d'estacions proporcionades per l'Agència Estatal de Meteorologia (AEMET). A més, considerem variables addicionals sobre episodis de pols (calima) i combustió de biomassa publicades pel Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

Donat que els factors demogràfics i l'estructura econòmica també tenen una incidència sobre la pol·lució, utilitzem dades de l'INE per calcular variables sobre la població i els percentatges d'ocupació en el sector de la manufactura i en el sector de la construcció.

2.2 Equacions principals

L'objectiu principal d'aquest treball és analitzar com la mobilitat influeix en la contaminació atmosfèrica. Per a això, s'utilitza el període de la pandèmia de la COVID-19 com un experiment natural i exogen, que permet estudiar de quina manera les restriccions de mobilitat implementades durant aquest temps van impactar sobre la pol·lució.

Primer estimem els efectes globals de la pandèmia amb el següent model empíric:

$$\ln(\text{Contaminant}_{it}) = \alpha + \beta \times \text{Pandemia}_t + \gamma \times \text{Controls}_{it} + \eta_{ixt} + \theta_t + v_{it} \quad (1)$$

on Contaminant_{it} fa referència al valor dels contaminants atmosfèrics NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ i SO_2 en el municipi i i el període t . Donat que disposem de dades per hores, t fa referència a una hora i dia específic.

Pandemia_t és una variable dicotòmica que indica el període de la COVID-19, prenent un valor de 1 en els dies entre l'inici del primer estat d'alarma a Espanya el 14/03/2020 i la finalització del tercer estat d'alarma el 8/05/2021. Aquesta variable pren valor 0 en el curt període pre-pandèmic entre el 14/02/2020 i el 13/03/2020 i en un llarg període post-pandèmic entre el 8/05/2021 i el 31/12/2022. El coeficient d'aquesta variable és β i indica en quin percentatge el contaminant analitzat varia en la pandèmia respecte el període no pandèmic.

Controls_i és un vector de variables controls relacionades amb la climatologia i meteorologia dels municipis (temperatura, precipitacions, humitat, hores de sol, calima, combustió de biomassa) i amb la demografia i estructura econòmica (població, percentatges d'ocupació en manufactures i construcció).

η_{ixt} és la interacció entre els efectes fixes de municipi i els efectes fixes d'hora, de dia de la setmana, de setmana del mes, i de mes de l'any. θ_t són efectes fixes d'any. Conjuntament, aquests efectes fixes ens permeten controlar per característiques municipals que no varien en el temps i per tendències temporals i l'estacionalitat. v_{it} és el terme error que captura efectes no observables.

A continuació, analitzem l'heterogeneïtat del període pandèmic per examinar els impactes diferenciats associats als diversos graus de restriccions a la mobilitat:

$$\ln(\text{Contaminant}_{it}) = \alpha + \beta_1 \times \text{Onada}_{1t} + \beta_2 \times \text{Normalitat}_t + \beta_3 \times \text{Onades 2-3}_t + \gamma \times \text{Controls}_{it} + \eta_{ixt} + \theta_t + v_{it} \quad (2)$$

on Onada 1_t és una variable dicotòmica que indica el període de la primera onada de la COVID-19,

prenent un valor de 1 entre l'inici (14/03/2020) i el final (21/06/2020) del primer estat d'alarma. Durant aquest subperíode es van aplicar les mesures més restrictives a la mobilitat, sent el seu màxim exponent el confinament domiciliari obligatori.

Normalitat_t és una variable dicotòmica vinculada al període que el govern d'Espanya va anomenar de la "nova normalitat". Pren un valor de 1 entre el 22/06/2020 i el 8/10/2020. Aquest subperíode està vinculat a la fi del confinament domiciliari i a la relaxació gradual de les restriccions a la mobilitat.

Per últim, **Onades2-3_t** és una variable dicotòmica que assenyalava els períodes de la segona i tercera onada. Pren un valor de 1 entre l'inici del segon estat d'alarma el 9/10/2020 i la fi del tercer estat d'alarma (i de la pandèmia) el 8/05/2021. Durant aquest període es van establir algunes restriccions a la mobilitat més relaxades com confinaments més tous (parcials, perimetrals) i el toc de queda.

Els coeficients d'aquestes tres variables β_1 , β_2 i β_3 indiquen en quins percentatges el contaminant analitzat varia en els respectius períodes pandèmics respecte el període no pandèmic.

Per últim, explotem l'elevat detall temporal de la base de dades per analitzar els efectes a les diferents hores del dia:

$$\ln(\text{Contaminant}_{it}) =$$

$$\begin{aligned} & \alpha + \beta_{0h} \times \sum_1^{23} \text{Hora}_h \times \text{No pandèmia}_t \\ & + \beta_{1h} \times \sum_0^{23} \text{Hora}_h \times \text{Onada 1}_t + \beta_{2h} \times \sum \text{Hora}_h \times \text{Normalitat}_t \\ & + \beta_{3h} \times \sum_0^{23} \text{Hora}_h \times \text{Onada 2-3}_t + \gamma \times \text{Controls}_{it} + \eta_{i \times t} + \theta_t + v_{it} \end{aligned} \quad (3)$$

on **Hora_h** és una variable dicotòmica que indica l'hora h del dia i està interaccionada amb les variables dels tres períodes pandèmics (**Onada 1_t**, **Normalitat_t** i **Onades 2-3_t**) i amb la variable dicotòmica del període no pandèmic (No pandèmiat). Els coeficients d'aquestes interaccions β_{0h} , β_{1h} , β_{2h} i β_{3h} indiquen en quins percentatges el contaminant analitzat varia en les diferents hores dels períodes pre-pandèmic i pandèmics respecte l'hora 0 (mitjanit) del període no pandèmic.

En conjunt, els coeficients estimats de les tres equacions permeten analitzar l'impacte de la pandèmia de la COVID-19 sobre els nivells de pol·lució. Si ens centrem en el subperíode de la primera onada quan es van aplicar les restriccions a la mobilitat més estrictes (amb el confinament domiciliari obligatori), els coeficients estimats de **Onada 1_t** a les equacions (2) i (3) es poden interpretar com una aproximació als possibles efectes de fenòmens cada cop més importants en la nostra vida com el teletreball o el comerç electrònic.

3. Mobilitat en temps de la pandèmia

3.1 Per què estudiar el període de la pandèmia?

El període de la pandèmia de la COVID-19 és un escenari ideal per estudiar com la mobilitat afecta a la pol·lució. En aquest sentit, les decisions polítiques adoptades durant la pandèmia no es van fonamentar en criteris ambientals, sinó principalment en consideracions sanitàries, socials i econòmiques. L'objectiu primordial d'aquestes mesures era contenir la propagació del virus i protegir la salut pública, especialment davant el risc de col·lapse dels sistemes sanitaris. Així mateix, es van tenir en compte aspectes com la protecció dels col·lectius més vulnera-

bles, la necessitat de garantir la continuïtat de serveis essencials, i la mitigació dels efectes econòmics derivats de les restriccions d'activitat. Per tant, les polítiques de limitació de la mobilitat es van dissenyar en resposta a una situació d'emergència sanitària i no amb la finalitat explícita de reduir la contaminació atmosfèrica.

3.2 Evidència descriptiva

Amb l'objectiu d'analitzar l'impacte de la pandèmia sobre la mobilitat, utilitzem dades provinents de l'Estudio de la Movilidad con Big Data del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Aquest estudi es fonamenta en l'ús de dades anonimitzades de telefonia mòbil, proporcionades per l'operadora Orange, i permet estimar i quantificar els patrons de mobilitat horària entre municipis a tot l'Estat espanyol a partir del 14 de febrer de 2020.

En concret, el conjunt de dades inclou informació detallada sobre el nombre de desplaçaments origen-destí, diferenciats en tres categories: (1) interiors, és a dir, desplaçaments que es produeixen dins del mateix municipi; (2) sortides, que corresponen a desplaçaments amb origen al municipi analitzat i destinació a un altre; i (3) entrades, que fan referència a desplaçaments amb origen en altres municipis i destinació al municipi en qüestió.

La Taula 1 presenta l'evolució del nombre de desplaçaments durant diferents períodes: el període pre-pandèmic (14/02/2020–13/03/2020), tres etapes dins del període pandèmic (primera onada: 14/03/2020–21/06/2020; nova normalitat: 22/06/2020–08/10/2020; altres onades: 09/10/2020–08/05/2021) i, finalment, el període post-pandèmic (09/05/2021–31/12/2022). La taula s'organitza en dos panells: Panell A, amb el promig diari de desplaçaments, i Panell B, amb el promig per hora. En ambdós casos, es

manté la distinció entre desplaçaments interiors, sortides i entrades.

Segons el Panell A, abans de l'inici de la pandèmia, el nombre mitjà de desplaçaments interiors a Catalunya era d'uns 8 milions al dia. Aquesta xifra es redueix de forma dràstica durant la pandèmia: una caiguda del 39% durant la primera onada, i del 22% i 20% durant la nova normalitat i les posteriors onades, respectivament. En el període post-pandèmic, la mobilitat interior es recupera progressivament, fins a assolir valors pràcticament idèntics als del període previ a la crisi sanitària.

Pel que fa als desplaçaments de sortida i entrada, les xifres mostren una simetria esperada: els desplaçaments que surten d'un municipi en una franja horària determinada (per exemple, a les 7 h del matí) es corresponen sovint amb entrades registrades més tard (per exemple, a les 17 h). Ambdós tipus de desplaçaments se situaven entorn dels 5 milions diaris en el període previ a la pandèmia. Aquesta mobilitat també va experimentar una caiguda significativa del 46% durant la primera onada, i del 19% durant les etapes següents. En el període post-pandèmic, les xifres es recuperen fins a establitzar-se al voltant dels 4,8 milions diaris.

El Panell B de la Taula 1 mostra resultats coherents amb els del Panell A, però expressats en termes horaris. S'hi observa una reducció mitjana del 38% en els desplaçaments interiors per hora i del 46% en els desplaçaments d'entrada i sortida durant la primera onada. Durant les fases següents de la pandèmia, la reducció es modera, situant-se entorn del 19% per als interiors i del 25% per als moviments entre municipis. Amb l'aixecament de les restriccions, els valors horaris tornen a nivells molt similars, i fins i tot lleugerament superiors en el cas dels interiors, als del període anterior a la pandèmia.

Taula 1: Desplaçaments per períodes i tipologia

	Pre-pandèmia	Pandèmia			Post-pandèmia
		Primera onada	Nova normalitat	Altres onades	
	14/02/2020- 13/03/2020	14/03/2020- 21/06/2020	22/06/2020- 08/10/2020	09/10/2020- 08/05/2021	09/05/2021- 31/12/2022
Panell A: Promig dia					
Interiors	7.945.008	4.861.602	6.165.126	6.309.154	8.059.773
Sortides	5.021.360	2.693.164	4.058.014	3.771.844	4.833.482
Entrades	5.015.769	2.690.468	4.056.299	3.768.049	4.835.297
Panell B: Promig hora					
Interiors	6.179	3.811	4.803	4.929	6.339
Sortides	3.876	2.082	3.132	2.915	3.730
Entrades	3.871	2.080	3.130	2.911	3.731

La Figura 1 representa gràficament l'evolució del nombre total de desplaçaments totals per hora entre els anys 2020 i 2023. La línia blava mostra el valor horari mitjà de cada dia, on s'identifica clarament una variabilitat setmanal i estacional, condicionada per l'activitat laboral i el calendari festiu (amb descensos sistemàtics durant caps de setmana, períodes vacacionals i dies festius). La línia vermella correspon a la mitjana mòbil de 7 dies, que permet suavitzar les oscil·lacions puntuals i captar la tendència general.

Les línies verticals discontinües de color negre delimiten els diferents períodes analitzats: pre-pandèmia, primera onada, nova normalitat, altres onades i post-pandèmia. Així mateix, s'ha destacat el període comprès entre el 14 de febrer i el 13 de març amb un ressaltat específic per facilitar la comparació interanual entre

els anys 2020 (pre-pandèmia), 2021 (pandèmia) i 2022 (post-pandèmia).

Els resultats mostren nivells elevats i estables de mobilitat abans de la pandèmia, seguits d'una caiguda abrupta durant la primera onada, com a conseqüència de les mesures de confinament. Posteriorment, es produeix una recuperació parcial i progressiva durant la nova normalitat i les onades següents, que culmina, a partir del maig de 2021, amb una tendència de recuperació sostinguda fins a valors semblants als observats abans de la crisi sanitària.

La comparació del mateix període (14/02-13/03) entre anys permet visualitzar clarament l'impacte inicial de la pandèmia sobre la mobilitat i la posterior restauració del comportament habitual dels desplaçaments.

Figura 1: Desplaçaments totals per hora



4. Pol·lució i restriccions a la mobilitat

4.1 Resultats

En aquesta secció es presenten els resultats derivats de l'aplicació de l'estratègia empírica descrita a la Secció 2, que permet analitzar l'impacte de la mobilitat sobre els nivells de contaminació atmosfèrica als municipis catalans. El període de la pandèmia de la COVID-19 actua com un experiment natural, atès que les restriccions de mobilitat implementades durant aquest interval ofereixen una oportunitat única per a l'avaluació d'aquesta relació causal.

Primer, estudiem els efectes globals de les restriccions a la mobilitat que es van aplicar durant tot el període de la pandèmia estimant l'Equació 1. La Taula 2 mostra els resultats quan

s'utilitza com a variable depenent el logaritme de les emissions de NO_x (Columna 1), de PM_{10} (Columna 2), de $\text{PM}_{2.5}$ (Columna 3) i de SO_2 (Columna 4).

En general, els coeficients estimats mostren una reducció de la pol·lució durant el període pandèmic. Aquesta reducció i la seva significativitat varia segons el pol·lutant. El descens més pronunciat s'observa en el cas del NO_x , amb una reducció significativa del 33% respecte el període no pandèmic, fet coherent amb la dràstica disminució del trànsit rodat, principal font d'aquest contaminant. Pel que fa al PM_{10} , s'estima una reducció del 7% (marginalment significativa), mentre que el $\text{PM}_{2.5}$ presenta una reducció no significativa del 24%. Finalment, les emissions de SO_2 disminueixen un 16%.

Taula 2: Pol·lució i COVID-19 a Catalunya: Efectes globals

Variable dependent:	log(Contaminant)			
	NO _x [1]	PM ₁₀ [2]	PM _{2.5} [3]	SO ₂ [4]
Període de la pandèmia (14/03/2020-08/05/2021)	-0.331 ^a (0.037)	-0.071 ^c (0.041)	-0.243 (0.157)	-0.164 ^a (0.040)
Efectes Fixes d'Any	✓	✓	✓	✓
Efectes Fixes interaccionats de Municipi, Mes, Setmana, Dia i Hora	✓	✓	✓	✓
Controls de Demografia i Estructura Econòmica	✓	✓	✓	✓
Controls de Clima-Meteorologia	✓	✓	✓	✓
R ² Ajustada	0.870	0.694	0.689	0.639
Observacions	211,357	128,490	11,877	140,822

Notes: Errors estàndard robustos clusteritzats a nivell de municipi i data en parèntesis. ^a, ^b i ^c indiquen significatiu al nivell de l'1, 5 i 10 per cent, respectivament.

A continuació, estimem l'Equació 2 on desagreguem el període pandèmic en tres períodes amb diferents graus de restriccions a la mobilitat: Primera onada (14/03/2020-21/06/2020), nova normalitat (22/06/2020-08/10/2020), i segona i altres onades (09/10/2020-08/05/2021). La Taula 3 mostra els resultats d'aquesta anàlisi diferenciada, revelant una heterogeneïtat notable en els impactes.

El NO_x mostra una reducció destacada del 56% durant la primera onada, quan les restriccions van ser més estrictes. Aquest efecte es redueix al 7% durant la nova normalitat i es manté en el 26% en les onades posteriors, evidenciant l'impacte sostingut de la reducció de la mobilitat. Els efectes sobre el PM₁₀ són menys consistents: una caiguda inicial del 32% seguida d'un increment del 16% durant la nova normalitat i una desaparició de l'efecte en les fases posteriors. El PM_{2.5} es redueix un 35% durant la primera onada, amb efectes no significatius en la resta del període. Les emissions de SO₂, per la seva banda, presenten un descens progressiu: 10% en la primera onada, 1% durant la nova normalitat i fins a un 26% en les següents onades, la qual cosa suggereix una afectació més persistent sobre les activitats econòmiques que el generen.

Taula 3: Pol·lució i COVID-19 a Catalunya: Onades i Nova Normalitat

Variable dependent:	log(Contaminant)			
	NO _x [1]	PM ₁₀ [2]	PM _{2.5} [3]	SO ₂ [4]
Primera onada (14/03/2020-21/06/2020)	-0.564 ^a (0.040)	-0.316 ^a (0.045)	-0.349 ^b (0.170)	-0.103 ^b (0.044)
Nova normalitat (22/06/2020-08/10/2020)	-0.066 ^c (0.039)	0.160 ^a (0.043)	-0.054 (0.222)	-0.182 ^a (0.044)
Segona i tercera onades (09/10/2020-08/05/2021)	-0.263 ^a (0.042)	0.017 (0.049)	0.075 (0.194)	-0.255 ^a (0.050)
Efectes Fixes d'Any	✓	✓	✓	✓
Efectes Fixes interaccionats de Municipi, Mes, Setmana, Dia i Hora	✓	✓	✓	✓
Controls de Demografia i Estructura Econòmica	✓	✓	✓	✓
Controls de Clima-Meteorologia	✓	✓	✓	✓
R ² Ajustada	0.874	0.705	0.693	0.640
Observacions	211,357	128,490	11,877	140,822

Notes: Errors estàndard robustos clusteritzats a nivell de municipi i data en parèntesis. ^a, ^b i ^c indiquen significatiu al nivell de l'1, 5 i 10 per cent, respectivament.

Per últim, estimem l'Equació 3 per tal d'analitzar l'evolució horària de la contaminació i, en particular, l'impacte per hores de les restriccions a la mobilitat introduïdes durant la pandèmia de la COVID-19. Concretament, la Figura 2 mostra els coeficients estimats del període no pandèmic (en blau) i del període pandèmic més sever de la primera onada (en vermell) en els gràfics de l'esquerra (Figures 2a, 2c, 2e i 2g), així com la diferència dels coeficients en els gràfics de la dreta (Figures 2b, 2d, 2f i 2h). Tal i com s'indica amb més detall a la Secció 2, aquests coeficients prenen com a referència l'hora 0 (mitjanit) del període no pandèmic i, per tant, mostren les variacions percentuals entre l'hora analitzada i la mitjanit.

En general, en el període no pandèmic en general s'observa que la pol·lució (1) es redueix durant les primeres hores del dia (d'1 a 5 h) i (2) és superior a la de mitjanit a partir de les 7-8 h del matí fins a les 23 h de la nit, assolint màxims

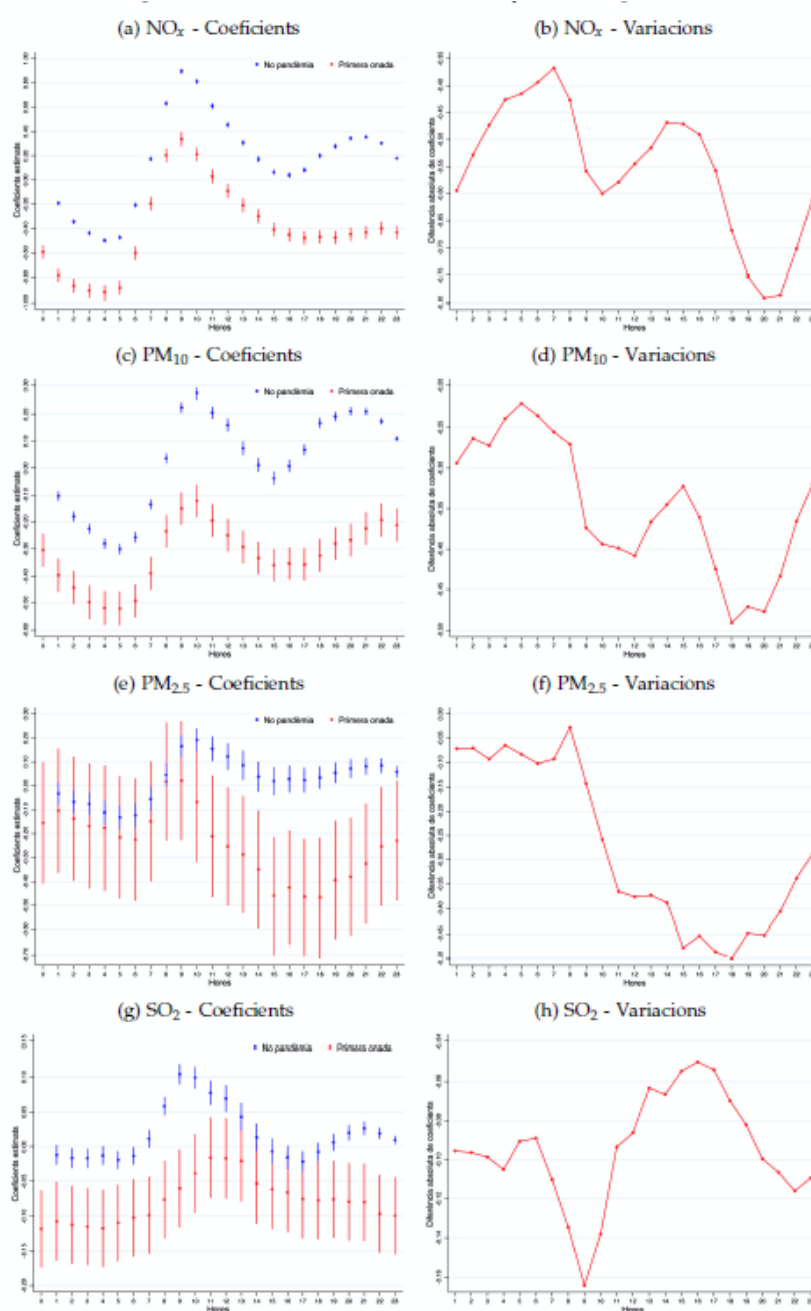
de pol·lució a les 9-10 h del matí i a les 20-21 h de la nit. En el període pandèmic de la primera onada s'observa una evolució horària similar però acompanyada d'una reducció generalitzada dels nivells de pol·lució respecte el període no pandèmic. En particular, es detecta una reducció significativa dels nivells de contaminació durant les hores tradicionalment punta del trànsit (matí i tarda).

Pel cas específic del NO_x, la comparativa dels coeficients estimats dels dos períodes (Figura 2a) mostra una clara reducció d'aquest contaminant durant les hores de màxima mobilitat (al voltant de les 8-11 h i les 18-20 h, que coincideixen amb els desplaçaments habituals per motius laborals. La diferència de coeficients (Figura 2b) indica una caiguda superior a 60 punts percentuals en alguns d'aquests moments punta. Això reflecteix la forta relació entre aquest contaminant i la mobilitat.

També es detecta una disminució notable del PM_{10} durant el període pandèmic (Figura 2c), especialment a primera hora del matí i al vespre. La diferència de coeficients entre perío-

des (Figura 2d) mostra descensos d'entre 20 i 40 punts percentuals.

Figura 2: Pol·lució i COVID-19 a Catalunya: Efectes per hores



La reducció de $PM_{2.5}$ és lleugerament menys pronunciada que la del PM_{10} , però segueix un patró similar, amb els descensos més marcats i significatius a partir de les 11 h del matí (Figura 2e). La diferència de coeficients (Figura 2f) es situa al voltant dels 30 a 50 punts percentuals.

Per últim, l'impacte sobre el SO_2 de les restriccions a la mobilitat durant la primera onada és molt més modest i irregular. Tot i això, els coeficients estimats es redueixen significativament durant les hores punta del matí i de la tarda-vespre (Figura 2g). La diferència de coeficients entre períodes (Figura 2h) mostra descensos d'entre 5 i 17 punts percentuals. Això es deu probablement al fet que el SO_2 prové principalment de processos industrials i no tant del trànsit urbà.

4.2 Interpretació

Els resultats obtinguts mostren una relació clara entre la reducció de la mobilitat durant el període pandèmic i el descens de diversos contaminants atmosfèrics. Aquest impacte és especialment evident durant la primera onada i es va atenuant progressivament a mesura que es relaxen les restriccions, fet que posa de manifest la forta vinculació entre l'activitat humana —particularment la mobilitat i la producció industrial— i la qualitat de l'aire en entorns urbans.

A més, les dades horàries evidencien que la reducció de la mobilitat no només va influir en els nivells globals de contaminació, sinó que també en va modificar profundament la dinàmica diària. L'atenuació dels pics de contaminació en hores punta s'associa a una davallada significativa dels desplaçaments laborals, principalment arran de l'adopció massiva i forçosa del teletreball. Aquest canvi en els patrons de mobilitat va reduir notablement el trànsit du-

rant les primeres hores del matí i al final de la tarda, coincidint amb les franges horàries que han mostrat els majors beneficis ambientals.

D'altra banda, l'augment del comerç electrònic com a substitut parcial del desplaçament físic a establiments comercials també hauria contribuït a disminuir la mobilitat individual. Tot i això, aquest efecte podria haver estat parcialment compensat per l'increment del trànsit de vehicles de repartiment. Malgrat això, la distribució horària d'aquesta activitat logística no sembla reproduir els patrons de congestió associats al trànsit privat, la qual cosa ajudaria a explicar la reducció neta de la contaminació durant les hores punta.

En conjunt, els resultats aporten evidències sòlides sobre com l'alteració dels hàbits laborals i de consum pot generar efectes ambientals significatius, especialment pel que fa a la millora de la qualitat de l'aire en les hores del dia amb més exposició humana.

5. Conclusions

Aquest treball ha explorat l'impacte de la mobilitat sobre la contaminació atmosfèrica als municipis de Catalunya, aprofitant l'experiment natural que va representar la pandèmia de la COVID-19. Les restriccions imposades durant aquest període, tot i no estar orientades a finalitats ambientals, van generar una reducció dràstica i sobtada dels desplaçaments, oferint una oportunitat única per analitzar com els canvis en l'activitat humana poden influir en la qualitat de l'aire.

Els resultats mostren una disminució significativa dels nivells de diversos contaminants atmosfèrics durant la pandèmia, especialment durant la primera onada, quan les restriccions a la mobilitat van ser més severes. En concret, els nivells de NO_x es van reduir en un 56% durant aquest període, confirmant la forta dependència d'aquest contaminant respecte del trànsit rodat. També es van observar reduccions importants en els nivells de PM_{10} i $\text{PM}_{2.5}$, així com un descens progressiu del SO_2 , més vinculat a l'activitat industrial.

Una de les aportacions metodològiques més destacades de l'estudi és l'ús de dades horàries, que ha permès identificar no només canvis globals en la contaminació, sinó també alteracions en la seva distribució al llarg del dia. Durant els períodes amb més restriccions, s'observa una atenuació clara dels pics de contaminació coincidint amb les hores punta de trànsit (matí i tarda), que habitualment corresponen als desplaçaments laborals. Aquesta evidència apunta directament a l'impacte del teletreball massiu i obligat durant la pandèmia, i subratlla la importància d'aquest tipus de mesures en la millora de la qualitat de l'aire.

També es considera l'impacte del comerç elec-

trònic com un factor que pot haver reduït la mobilitat individual. Tot i que el repartiment de paquets ha augmentat, la seva distribució horària sembla evitar les franges més congestionades, contribuint potencialment a una menor pressió ambiental durant les hores punta. Aquest element posa de manifest com els canvis estructurals en els hàbits de consum poden tenir conseqüències ambientals indirectes i rellevants.

Els resultats obtinguts tenen implicacions clares per al disseny de polítiques públiques. En primer lloc, demostren que la reducció de la mobilitat — en especial del vehicle privat — pot tenir efectes positius immediats i mesurables sobre la qualitat de l'aire urbà. Això dona suport a polítiques com les zones de baixes emissions, els peatges urbans o les restriccions temporals de trànsit, sempre que es dissenyin amb criteris d'eficiència i equitat.

En segon lloc, l'estudi posa de relleu el potencial del teletreball com a eina de sostenibilitat ambiental. Tot i que no és una mesura aplicable universalment, la seva promoció de manera estructurada pot contribuir a reduir els desplaçaments diaris, especialment en entorns urbans densos. Aquest fet pot comportar millores no només ambientals, sinó també en la salut pública i la qualitat de vida.

Finalment, els resultats fan evident la importància d'abordar la gestió de la mobilitat des d'una perspectiva integral i preventiva. Més enllà de mesures puntuals, cal promoure models de ciutat que redueixin la necessitat de desplaçaments llargs i freqüents. Estratègies com la ciutat dels 15 minuts, la densificació controlada, la promoció del transport públic i actiu, i una logística urbana més eficient poden generar beneficis ambientals sostinguts i inclusius.

En definitiva, aquest estudi mostra com canvis

dràstics però temporals en els patrons de mobilitat poden tenir efectes substancials en la qualitat de l'aire. Si bé la pandèmia ha estat una situació extrema i indesitjable, ens ha ofert una finestra única per comprendre la magnitud de la influència humana sobre el medi ambient urbà. Incorporar aquests aprenentatges en les polítiques públiques i en la planificació urbana pot contribuir decisivament a construir ciutats més netes, saludables i resilients en un context de crisi climàtica i transformació social.

Referències

- Agència Europea del Medi Ambient. 2019. Air quality in Europe – 2019 reports. Luxembourg:
- Publications Office of the European Union. Bernardo, Valeria, Xavier Fageda, and Ricardo Flores-Fillol. 2021. Pollution and congestion in urban areas: The effects of low emission zones. *Economics of Transportation* 26-27: 100221. url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212012221000265>.
- Borck, Rainald and Philipp Schrauth. 2021. Population density and urban air quality. *Regional Science and Urban Economics* 86: 103596. url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166046220302817>.
- Carozzi, Felipe and Sefi Roth. 2023. Dirty density: Air quality and the density of american cities. *Journal of Environmental Economics and Management* 118: 102767. url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069622001206>.
- Castells-Quintana, David, Elisa Dienesch, and Melanie Krause. 2021. Air pollution in an urban world: A global view on density, cities and emissions. *Ecological Economics* 189: 107153. url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800921002111>.
- Comissió Europea. 2021. Developments and Forecasts on Continuing Urbanisation. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Malina, Christiane and Frauke Scheffler. 2015. The impact of low emission zones on particulate matter concentration and public health. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77: 372-385. url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856415001159>.
- Organització Mundial de la Salut. 2022. World health statistics 2022: monitoring health for the SDGs, sustainable development goals. Geneva: World Health Organization.
- Tassinari, Filippo. 2024. Low emission zones and traffic congestion: Evidence from madrid central. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 185: 104099. url <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856424001472>.
- Wolff, Hendrik. 2014. Keep your clunker in the suburb: Low-emission zones and adoption of green vehicles. *The Economic Journal* 124(578): F481-F512. url <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/eoj.12091>.