



Stima della riduzione delle emissioni di CO₂ nel trasporto merci attraverso l'implementazione della Rete ferroviaria del Pacifico in Colombia

Estimation of the reduction of CO₂ emissions in cargo trans-portion through the implementation of the Pacific railroad network in Colombia

Nicoletta GONZÁLEZ-CANCELAS^(*)
Cristian Camilo PÉREZ-ALMANZA^(**)
Alberto CAMARERO-ORIVE^(*)
Javier VACA-CABRERO^(***)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.11.2024.ART.2>)

Sommario - Questo articolo stima la riduzione delle emissioni di gas serra nel trasporto di merci tra il porto di Buenaventura e la regione di Bogotá-Cundinamarca in Colombia, attraverso la realizzazione di un progetto ferroviario tra Buenaventura e la Rete Ferroviaria Centrale, utilizzando le metodologie approvate dal Clean Development Mechanism-CDM.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, diverse organizzazioni internazionali hanno intensificato i loro sforzi per ridurre le emissioni di gas serra attraverso accordi vincolanti, promozione delle energie rinnovabili e finanziamenti per il clima [1]. Accordi come il Protocollo di Kyoto e l'Accordo di Parigi stabiliscono impegni globali per limitare l'aumento della temperatura. Inoltre, meccanismi finanziari come il Fondo Verde per il Clima e il Fondo Globale per l'Ambiente mobilitano risorse per progetti sostenibili nei paesi in via di sviluppo [2].

Allo stesso tempo, vi è una forte spinta verso la mobilità sostenibile e lo sviluppo di tecnologie pulite. Stanno guadagnando terreno le iniziative per migliorare i trasporti aumentando la quota modale di trasporti ottimali e meno inquinanti [3]. Le strategie integrate che combinano mitigazione e adattamento sono essenziali per affrontare in modo olistico le sfide del cambiamento climatico [4].

Summary - This article estimates the reduction of greenhouse gas emissions in the transportation of cargo between the port of Buenaventura and the Bogotá-Cundinamarca region in Colombia, through the implementation of a railroad project between Buenaventura and the Central Railroad Network, using the methodologies approved by the Clean Development Mechanism-CDM.

1. Introduction

In recent decades, different international organizations have intensified their efforts to reduce greenhouse gas emissions through binding agreements, promotion of renewable energy, and climate finance [1]. Agreements such as the Kyoto Protocol and the Paris Agreement set out global commitments to limit temperature rise. In addition, financial mechanisms such as the Green Climate Fund and the Global Environment Facility mobilize resources for sustainable projects in developing countries [2].

At the same time, there is a strong push towards sustainable mobility and the development of clean technologies. Initiatives to improve transport by increasing the modal share of optimal, less polluting transports are gaining traction [3]. Integrated strategies that combine mitigation and adaptation are essential to holistically address the challenges of climate change [4].

The transport sector is one of the most responsible

^(*) Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, del Territorio e dell'Urbanistica. ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, calle Profesor Aranguren 3, 28040 Madrid, Spagna.

^(**) Laurea Magistrale in Sistemi Ingegneria Civile.

^(***) Autore di riferimento: Javier VACA-CABRERO j.vaca@upm.es.

^(*) Department of Transport, Territorial and Urban Planning Engineering. ETSI Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, calle Profesor Aranguren, 3, 28040 Madrid, Spain.

^(**) MSc in Civil Engineering Systems student.

^(***) Correspondence: j.vaca@upm.es.

Il settore dei trasporti è uno dei maggiori responsabili in termini di emissioni di gas serra (GHG), essendo il secondo più grande contributore alle emissioni totali di gas serra, ciò rende sempre più necessaria la partecipazione di mezzi a minore intensità di carbonio, la ricerca di miglioramenti di efficienza in ciascuna modalità, la diversificazione della matrice modale, il miglioramento della velocità di alcune linee ferroviarie ad alta velocità per il trasporto merci [5][6].

In questo senso, il trasporto merci su rotaia è essenziale per conseguire un trasporto sostenibile, grazie ai suoi vantaggi competitivi come l'elevata capacità, l'efficienza nel trasporto a lunga distanza, i bassi tassi di incidenti e, soprattutto, le basse emissioni di CO₂ e la sostenibilità ambientale [7]. Queste caratteristiche rendono la ferrovia un'alternativa praticabile ad altri modi di trasporto e rispettosa dell'ambiente, come il trasporto su strada, che tendono ad essere più ad alta intensità di carbonio. L'adozione di soluzioni ferroviarie può contribuire in modo significativo alla riduzione delle emissioni del settore dei trasporti, promuovendo un futuro più sostenibile [8]. Considerando quanto sopra, il Piano Generale Ferroviario della Colombia-RMP [9] definisce che la riattivazione della ferrovia per il trasporto merci porterebbe vantaggi per la movimentazione dell'industria pesante e del carico ad alto volume, in particolare dai centri di produzione ai porti marittimi e viceversa.

Per questo motivo, tra i corridoi prioritari del RMP c'è il Corridoio Ferroviario del Pacifico (*Pacific Rail Corridor*) e il suo collegamento con la Rete Ferroviaria Centrale (*Central Rail Network*), che avrebbe un impatto sul collegamento del principale porto marittimo della Colombia nel comune di Buenaventura, il più grande porto del paese in termini di volume delle importazioni, con il centro del paese, integrando la rete ferroviaria dal Pacifico ai Caraibi [10].

In considerazione di quanto sopra, nel dicembre 2022, l'Agenzia Nazionale per le Infrastrutture della Colombia ha stipulato un contratto per gli studi di prefattibilità per il collegamento ferroviario del porto di Buenaventura con il corridoio ferroviario centrale, che potrebbe cambiare radicalmente il modo in cui il carico viene trasportato nel paese: attualmente, il carico viene trasportato su strada verso l'interno del paese, attraverso il corridoio logistico Bogotá-Buenaventura-Ipiales, che collega le città di Ipiales, Pasto, Popayan, Cali e Bogotá (tra gli altri).

Ora, è importante sapere che esiste una rete ferroviaria che un tempo collegava Buenaventura con La Tebaida (Quindio) e La Felisa (Caldas) nella regione del caffè, ma ha smesso di funzionare nel 2017 a causa di diversi problemi causati dalla non conformità del concessionario responsabile dell'infrastruttura e del funzionamento del corridoio. Attualmente, le condizioni della rete sono deprecabili e continuano a deteriorarsi a causa del mancato intervento dovuto a diverse cause pendenti tra ANI e il concessionario relative alla rete ferroviaria.

in terms of Greenhouse Gas (GHG) emissions, being the second largest contributor to total GHG emissions, this makes it increasingly necessary the participation of less carbon-intensive means, seeking efficiency improvements in each mode, the diversification of the modal matrix, improved speed of certain high-speed rail lines for freight transport [5].

In this sense, rail freight transport is essential to achieve sustainable transport, due to its competitive advantages such as its high capacity, efficiency in long-distance transport, low accident rates and, especially, its low CO₂ emissions and environmental sustainability [7]. These characteristics make rail a viable and environmentally friendly alternative to other modes of transport, such as road transport, which tend to be more carbon intensive. The adoption of rail solutions can contribute significantly to the reduction of emissions from the transport sector, promoting a more sustainable future.[8]. Considering the above, the Railway Master Plan of Colombia-RMP [9] defines that the reactivation of the railroad for cargo transportation would bring advantages for the mobilization of heavy industry and high-volume cargo, especially from production centres to seaports and vice versa.

For this reason, among the corridors prioritized by the RMP is the Pacific Rail Corridor and its connection with the Central Rail Network, which would have an impact on the connection of Colombia's main seaport in the municipality of Buenaventura, the country's largest port in terms of import volume, with the centre of the country, integrating the Rail Network from the Pacific to the Caribbean [10].

In view of the above, in December 2022, Colombia's National Infrastructure Agency contracted the prefeasibility studies for the Railway Connection of the Port of Buenaventura with the Central Railway Corridor, which could radically change the way cargo is transported in the country: currently, cargo is transported by road to the interior of the country, through the Bogotá-Buenaventura-Ipiales Logistics Corridor, which links the cities of Ipiales, Pasto, Popayan, Cali and Bogota (among others).

Now, it is important to know that there is a rail network that once connected Buenaventura with La Tebaida (Quindio) and La Felisa (Caldas) in the coffee region, but it stopped operating in 2017 due to different problems caused by non-compliance of the concessionaire in charge of the infrastructure and operation of the corridor. Currently, the condition of the network is deplorable, and it continues to deteriorate due to the lack of intervention due to the different lawsuits pending between ANI and the concessionaire over the railway network.

For this reason, the following article will quantitatively estimate the amount of CO₂ emissions that could be reduced through the implementation of a new rail connection project between Buenaventura and the Central Railway Network, especially in the cargo transported to the Bogotá-Cundinamarca region.

Per questo motivo, il seguente articolo stimerà quantitativamente la quantità di emissioni di CO₂ che potrebbero essere ridotte attraverso la realizzazione di un nuovo progetto di collegamento ferroviario tra Buenaventura e la Rete Ferroviaria Centrale, in particolare nel carico trasportato alla regione di Bogotá-Cundinamarca.

2. Sintesi narrativa

2.1. Emissioni di gas serra dal settore dei trasporti

Il settore dei trasporti è uno dei maggiori contributori alle emissioni di gas serra (GHG), essendo il secondo più grande contributore alle emissioni totali (Fig. 1), secondo solo al settore energetico (IPCC, 2014). Inoltre, questo settore rappresenta oltre il 50% del consumo globale di petrolio [11], con il trasporto merci responsabile di un aumento del 35% del consumo netto totale di petrolio tra il 2010 e il 2015. Ciò è aggravato dall'uso di prodotti petroliferi ad alta intensità di carbonio (diesel e benzina) nel trasporto merci su strada, che rappresenta una sfida per la decarbonizzazione del settore [12].

Questo è il motivo per cui la riduzione delle emissioni nel trasporto merci su strada svolge un ruolo cruciale nella mitigazione dei cambiamenti climatici. Diversi paesi hanno implementato politiche economiche per incentivare la riduzione delle emissioni nel settore, come le tasse sul carbonio, le tasse sul carburante, ecc. [12]. Tuttavia, il contributo di questo settore alle emissioni totali di gas serra rende necessaria la partecipazione di modalità a minore intensità di carbonio, la ricerca di miglioramenti di efficienza in ciascuna modalità e la diversificazione della matrice modale [6].

Ma la decarbonizzazione nel trasporto merci tende ad essere più difficile da raggiungere, poiché coinvolge più parti interessate sia del settore pubblico che privato [13]. Per affrontare la sfida della decarbonizzazione del trasporto merci, [14] occorre proporre cinque strategie: i) riduzione della domanda di trasporto merci, ii) ottimizzazione dell'uso e del carico dei veicoli di trasporto, iii) aumento dell'efficienza energetica dei veicoli, iv) riduzione del contenuto di carbonio del carburante utilizzato nel trasporto merci e v) passaggio dalla modalità di trasporto merci a quella a bassa intensità di carbonio.

Alla luce di quanto sopra, il trasferimento modale è stato visto dai responsabili politici come il modo più promettente per mitigare i problemi ambientali e di congestione [15]. Tuttavia, il raggiungimento del trasferimento modale rimane una sfida a causa di alcuni fattori, come la mancanza

2. Literature Review

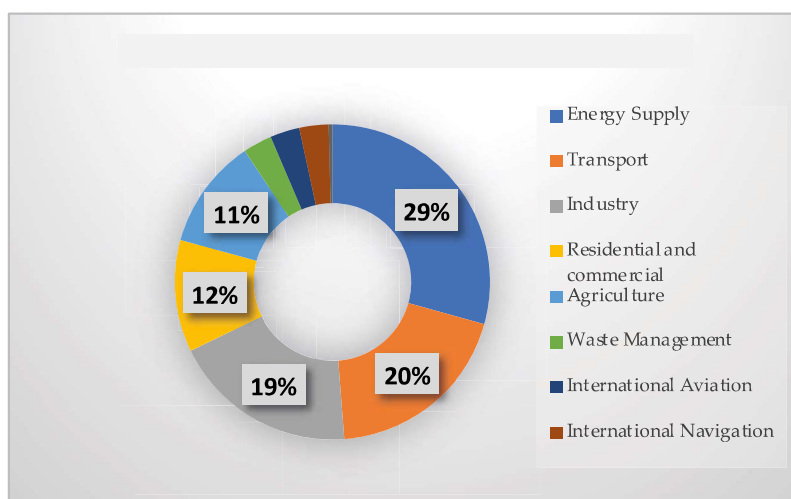
2.1. GHG emissions from the transport sector

Transport sector is one of the largest contributors to greenhouse gas (GHG) emissions, being the second largest contributor to total emissions (Fig. 1), behind only the energy sector (IPCC, 2014). Furthermore, this sector accounts for more than 50% of global oil consumption [11], with freight transport being responsible for a 35% increase in total net oil consumption between 2010 and 2015. This is exacerbated using carbon-intensive petroleum products (diesel and gasoline) in road freight transport, representing a challenge for the decarbonisation of the sector [12].

This is why reducing emissions in road freight transport plays a crucial role in climate change mitigation. Different countries have implemented economic policies to incentivise emission reductions in the sector, such as carbon taxes, fuel taxes, etc. [12]. However, the contribution of this sector in the total GHG emissions makes necessary the participation of less carbon-intensive modes, seeking efficiency improvements in each mode, and the diversification of the modal matrix [6].

But decarbonisation in freight transport tends to be more difficult to achieve, as it involves more stakeholders from both the public and private sectors [13]. To address the challenge of decarbonisation of freight transport, [14] propose five strategies: i) reducing freight transport demand, ii) optimising the use and loading of transport vehicles, iii) increasing the energy efficiency of vehicles, iv) reducing the carbon content of fuel used in freight transport, and v) mode shifting from freight transport to low carbon intensity.

Given the above, modal shift has been seen by policy makers as the most promising way to alleviate environ-



(Fonte - Source: IPCC)

Figura 1 - Emissioni di gas serra per settore nel 2014.

Figure 1 - GHG emissions by sector in 2014.

di flessibilità delle ferrovie e delle navi nella quantità di consegna, nella frequenza e nella programmazione, i servizi ferroviari e fluviali tendono ad essere più lenti e meno frequenti rispetto ai viaggi su strada e hanno bisogno di volumi di spedizione più grandi e più stabili per essere convenienti [16].

Tuttavia, il trasporto ferroviario e per vie navigabili interne sono identificati come attori chiave per raggiungere la diversificazione modale, considerando che attraverso queste modalità di trasporto viene consumata meno energia per tonnellata trasportata, vi è una minore emissione di gas serra e si generano esternalità positive come una diminuzione del numero di incidenti stradali e congestione sulle strade [17]. I costi esterni per il trasporto stradale, ferroviario e fluviale sono stimati rispettivamente a 0,042, 0,013 e 0,019 euro per tonnellata-kilometro trasportata [18], rilevando che una significativa riduzione del costo delle esternalità si ottiene del 70% attraverso l'uso della ferrovia e del 55% con il trasporto fluviale.

2.2. La ferrovia come strategia per ridurre le emissioni di CO₂ nel trasporto merci

Il trasporto merci su rotaia è fondamentale per ottenere un trasporto sostenibile, avendo come vantaggi competitivi la sua elevata capacità, l'efficienza del trasporto a lunga distanza, i bassi tassi di incidenti e, in particolare, le basse emissioni di CO₂ e la sostenibilità ambientale. Inoltre, la Commissione Europea ha suggerito che il settore della logistica può limitare le esternalità negative del trasporto trasferendo il traffico merci in una modalità meno dannosa per l'ambiente, come la ferrovia [19].

Inoltre, la modalità ferroviaria è riconosciuta come la modalità di trasporto più rispettosa dell'ambiente, non solo contribuendo alla decarbonizzazione del settore, ma anche consentendo un mercato dei trasporti sostenibile e competitivo. Un altro fattore che contribuisce al settore ferroviario consentendo un'elevata riduzione delle emissioni di CO₂ dal trasporto è che gran parte del sistema in tutto il mondo è alimentato da elettricità, il che rende il potenziale di profonda decarbonizzazione ancora più realizzabile e dipendente dall'uso di elettricità ecologica [20] [21].

Oltre a quanto sopra, una nuova ricerca mostra che l'idrogeno sta emergendo come un'opzione promettente per raggiungere la decarbonizzazione del settore ferroviario, grazie alla sua elevata capacità di generare energia senza l'emissione di inquinanti atmosferici nocivi, quindi questo carburante cerca di posizionarsi come alternativa alle locomotive e ai treni diesel su binari non elettrificati, in quello che dovrebbe essere un miglioramento sostanziale in termini di riduzione delle emissioni nel settore dei trasporti e nella catena logistica.

Tuttavia, il trasporto ferroviario nel mondo si è dimostrato problematico nell'aumentare la sua quota parte del trasporto merci. Nel caso europeo, questa quota della fer-

mental and congestion problems [15]. However, achieving modal shift remains a challenge due to some factors, such as railways and ships lack flexibility in delivery quantity, frequency and scheduling, rail and river services tend to be slower and less frequent compared to road trips, and they need larger and more stable shipping volumes to be cost-effective [16].

However, rail and inland waterway transport are identified as key actors to achieve modal diversification, considering that through these modes of transport less energy is consumed per tonne transported, there is a lower GHG emission, and positive externalities are generated such as a decrease in the number of road accidents and congestion on roads [17]. External costs for road, rail and waterway transport are estimated to be close to 0.042, 0.013, and 0.019 euros per tonne-kilometre transported respectively [18], noting that a significant reduction in the cost of externalities is achieved by 70% through the use of rail and 55% with waterway transport.

2.2. Rail as a strategy for reducing CO₂ emissions in freight transport

Rail freight transport is key to achieving sustainable transport, having as competitive advantages its high capacity, long distance transport efficiency, low accident rates, and in particular, low CO₂ emissions and environmental sustainability. Also, the European Commission has suggested that the logistics sector can limit the negative externalities of transport by shifting freight traffic to a less environmentally damaging mode, such as rail [19].

Moreover, the rail mode is recognised as the most environmentally friendly mode of transport, not only by contributing to the decarbonisation of the sector, but also by enabling a sustainable and competitive transport market. Another factor contributing to the rail sector enabling a high reduction of CO₂ emissions from transport is that a large fraction of the system worldwide is powered by electricity, which makes the potential for deep decarbonisation even more achievable and dependent on the use of green electricity [20][21].

In addition to the above, new research shows that hydrogen is emerging as a promising option to achieve the decarbonization of the railway sector, due to its high capacity to generate energy without the emission of harmful air pollutants, so this fuel seeks to position itself as an alternative to diesel-powered locomotives and trains on non-electrified tracks, in what is expected to be a substantial improvement in terms of reducing emissions in the transport sector and the logistics chain.

However, rail transport in the world has shown problematic to increase its share in the share of freight transport. In the European case, this share by national rail was 16.8% in 2020, decreasing 0.9% compared to 2019, and which achieved between 2010 and 2020 a maximum value of 19.2% in 2011 [22].

rovia nazionale è stata del 16,8% nel 2020, in diminuzione dello 0,9% rispetto al 2019, e che ha raggiunto tra il 2010 e il 2020 un valore massimo del 19,2% nel 2011 [22].

Al contrario, secondo i dati riportati dalla Banca interamericana di sviluppo [23] per il 2013 in America Latina e nei Caraibi, l'88% del tonnelloaggio ferroviario regionale è movimentato dai sistemi ferroviari del Brasile (465 milioni di tonnellate all'anno) e del Messico (110 milioni di tonnellate all'anno), seguiti in terza posizione dalla Colombia, raggiungendo per il Brasile una quota modale del settore ferroviario del 30% e per il Messico del 18%.

Tuttavia, il trasporto ferroviario fornisce un prezioso contributo alla catena logistica, in particolare per la movimentazione di prodotti sfusi e, negli ultimi anni, per la movimentazione di prodotti manufatti attraverso il trasporto intermodale [24]. Tuttavia, per diventare competitivi rispetto alla modalità stradale, i treni devono trasportare determinati volumi di carico e coprire una distanza effettiva per compensare i costi aggiuntivi dovuti al trasporto di container vuoti e ai trasbordi tra diversi modi [25].

Questa distanza effettiva dipende da diversi fattori, come le tariffe del trasporto ferroviario, i costi del trasporto su strada, il volume del carico, l'equilibrio del traffico e la posizione dei terminali ferroviari [26][27] (NIÉRAT, 1997), essendo nel caso dell'Europa generalmente 500 km o più (KREUTZBERGER, 2008).

Corridoi in cui i volumi di merci consentono carichi completi con la frequenza richiesta, i servizi diretti da terminal a terminal forniscono una buona qualità ed economia del trasporto; ma se i flussi di merci sono troppo piccoli per un servizio ferroviario completo, i volumi possono essere raggiunti consolidando le merci appartenenti a diverse regioni lungo lo stesso corridoio [25]. Tuttavia, i trasbordi coinvolti in questo tipo di operazione aggiungono costi aggiuntivi e tempi di movimentazione, che è uno dei motivi principali per cui gli operatori intermodali del trasporto ferroviario di merci semplificano le loro reti.

A causa di questa situazione, si può dire che è più attraente per gli operatori intermodali eseguire operazioni ferroviarie tra collegamenti diretti, dove è possibile organizzare carichi completi con la frequenza richiesta, che si può osservare nel caso europeo, dove le reti ferroviarie di trasporto merci collegano i principali agglomerati, centri di produzione industriale e porti container con le più importanti località interne.

2.3. Corridoio logistico Buenaventura-Bogotá e flotta di veicoli merci in Colombia

Secondo i dati del National Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Absorptions-INGEI, tra il 1990 e il 2018 la media annuale delle emissioni del settore dei trasporti in Colombia ha presentato una media annua di 26.612 GgCO₂eq, con un valore minimo nel 1990 di 19.773 GgCO₂eq e un massimo nel 2018 di 37.827 GgCO₂eq, che

As a contrast, according to figures reported by the Inter-American Development Bank [23] for 2013 in Latin America and the Caribbean 88% of the regional rail tonnage is mobilized by the rail systems of Brazil (465 million tons per year) and Mexico (110 million tons per year), followed in third position by Colombia, achieving for the case of Brazil a modal share of the rail sector of 30%, and for Mexico 18%.

However, rail transport makes a valuable contribution to the logistics chain, particularly for the movement of bulk products, and in recent years for the mobilization of manufactured products through intermodal transport [24]. Nevertheless, to become competitive against the road mode, trains must transport certain volumes of cargo and cover an effective distance to compensate for the additional costs due to the transport of empty containers and transshipments between different modes [25].

This effective distance depends on different factors, such as rail freight rates, road transport costs, cargo volume, traffic balance and the location of rail terminals [26][27] (NIÉRAT, 1997), being in the case of Europe generally 500 km or more (KREUTZBERGER, 2008).

Corridors where freight volumes allow full loads with the required frequency, direct terminal-to-terminal services provide good transport quality and economy; but if freight flows are too small for a full rail service, volumes can be achieved by consolidating goods belonging to different regions along the same corridor [25]. However, the transshipments involved in this type of operation add additional costs and handling time, which is one of the main reasons for intermodal rail freight operators to simplify their networks.

Due to this situation, it can be said that it is more attractive for intermodal operators to perform rail operations between direct links, where full loads can be arranged with the required frequency, which can be observed in the European case, where rail freight networks connect the main agglomerations, industrial production centres and container ports with the most important inland locations.

2.3. Buenaventura-Bogotá Logistical Corridor and freight vehicle fleet in Colombia

According to data from the National Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Absorptions-INGEI, between 1990 and 2018 the annual average of emissions from the transportation sector in Colombia presented an annual average of 26,612 Gg CO₂eq, finding a minimum value in 1990 of 19,773 Gg CO₂eq and a maximum in 2018 of 37,827 Gg CO₂eq, which is equivalent for 2018 to an increase of approximately 91% compared to 1990, and 42% compared to the annual average in the study period [28].

In addition to the above and according to INGEl, the dominant subcategory is Road Transportation, with a historical share of 81%, and which presents a constant growth between 1990 and 2018 attributed to the growth of the ve-

equivale per il 2018 ad un aumento di circa il 91% rispetto al 1990 e del 42% rispetto alla media annua nel periodo di studio [28].

Oltre a quanto sopra e secondo INGEI, la sottocategoria dominante è il Trasporto su Strada, con una quota storica dell'81%, e che presenta una crescita costante tra il 1990 e il 2018 attribuita alla crescita del parco veicoli in circolazione, e le cui emissioni sono principalmente attribuite all'uso di benzina (80%). Per quanto riguarda la sottocategoria Trasporto Ferroviario, è quella con la quota media storica più bassa (0,3%), a causa principalmente del suo basso sviluppo nel paese [29].

La flotta di veicoli merci colombiani nel 2022 era composta da un totale di 371.549 veicoli, di cui 274.946 veicoli di servizio pubblico (trasporto merci di terze parti), 85.456 veicoli di servizio privato (trasporto merci del proprietario) e 11.146 veicoli di servizio ufficiale (agenzie governative diverse). Del numero totale di veicoli nel parco veicoli, l'85,6% utilizza carburante diesel, l'11,7% benzina, l'1,1% elettrico e lo 0,8% gas naturale, il che dimostra la lenta transizione verso veicoli più rispettosi dell'ambiente [28].

Ciò è aggravato dall'età media dei veicoli, dove per il 2021 è aumentata rispetto all'anno immediatamente precedente, passando da 17,2 a 17,5 anni, questo nonostante varie iniziative del governo nazionale come il programma di Modernizzazione del Ministero dei Trasporti lanciato nel 2019, che punta a modernizzare la flotta con più di 20 anni e il peso lordo del veicolo oltre 10,5 tonnellate attraverso una serie di benefici economici per i proprietari [29].

Ciò è importante considerando che in uno dei principali corridoi logistici del paese, Bogotá-Buenaventura, il carico viene trasportato principalmente da camion. Questo corridoio è un'arteria fondamentale per il commercio della Colombia, in quanto facilita il trasporto di merci dall'interno del paese (e dalla capitale, Bogotá) al principale porto del Pacifico del paese e viceversa, il che è essenziale per le importazioni e le esportazioni del paese, soprattutto grazie all'interazione del commercio attraverso l'Oceano Pacifico con l'Asia e altri mercati. Si collega anche con il corridoio logistico Centro-Nord, che collega Bogotá e la regione centrale con Antioquia e la costa caraibica, completando la catena logistica tra i Caraibi e il Pacifico colombiano [28].

Nel 2022 l'area portuale di Buenaventura situata nel dipartimento della Valle del Cauca, ha movimentato 19.696.166 tonnellate, mentre l'altra area portuale del Pacifico colombiano (Tumaco, Nariño) ha movimentato solo 390.548 tonnellate. Ciò rende l'area portuale di Buenaventura la più importante di questa costa e la quarta più importante della Colombia, superata dai porti caraibici di Cartagena, Bolivar (41.639.313), Cienega, Magdalena (30.880.644) e il Golfo di Morrosquillo (27.269.681). Tuttavia, è il porto principale per le importazioni totali movimentate nel 2022, con 14.235.957 tonnellate, seguito dai

hicle fleet in circulation, and whose emissions are mainly attributed to the use of gasoline (80%). As for the Rail Transportation subcategory, it is the one with the lowest historical average share (0.3%), mainly due to its low development in the country [29].

The Colombian freight vehicle fleet in 2022 consisted of a total of 371,549 vehicles, of which 274,946 were public service vehicles (third-party freight transport), 85,456 private service vehicles (owner's freight transport), and 11,146 official service vehicles (different government agencies). Of the total number of vehicles in the vehicle fleet, 85.6% use diesel fuel, 11.7% gasoline, 1.1% electric, and 0.8% natural gas vehicles, which demonstrates the slow transition to more environmentally friendly vehicles [28].

This is aggravated by the average age of vehicles, where by 2021 it increased compared to the immediately previous year, going from 17.2 to 17.5 years, this despite various national government initiatives such as the Ministry of Transportation's Modernization program launched in 2019, which aims to modernize the fleet of more than 20 years old and gross vehicle weight over 10.5 tons through a series of economic benefits for owners [29].

This is important considering that in one of the principal logistics corridors in the country, Bogotá-Buenaventura, cargo is transported mainly by trucks. This corridor is a fundamental artery for Colombia's trade, as it facilitates the transport of goods from the interior of the country (and the capital, Bogotá) to the country's main Pacific port and vice versa, which is essential for the country's imports and exports, especially thanks to the interaction of trade via the Pacific Ocean with Asia and other markets. It also connects with the Central-North logistics corridor, which links Bogotá and the central region with Antioquia and the Caribbean coast, complementing the logistics chain between the Caribbean and the Colombian Pacific [28].

In 2022 the Buenaventura port area located in the department of Valle del Cauca, mobilized 19,696,166 tonnes, while the other Colombian Pacific port area (Tumaco, Nariño) only mobilized 390,548 tonnes. This makes the port area of Buenaventura the most important on this coast, and the fourth most important in Colombia, surpassed by the Caribbean ports of Cartagena, Bolivar (41,639,313), Cienega, Magdalena (30,880,644) and the Gulf of Morrosquillo (27,269,681). However, it is the main port for total imports mobilized in 2022, with 14,235,957 tonnes, followed by the ports of Cartagena (10,217,057) and Santa Marta, Magdalena (9,236,090) in the Caribbean [29].

Now, it is observed that the tons mobilized from the port of Buenaventura register the same department of Valle del Cauca as the main destination of the trips, followed by the department of Cundinamarca and Bogotá, although it is important to mention that many of the goods are redistributed from Valle del Cauca to other areas of the country (Fig. 2).

Most of this cargo is transported by road (this is due to the inactivity of the Pacific rail network, which will be dis-

porti di Cartagena (10.217.057) e Santa Marta, Magdalena (9.236.090) nei Caraibi [29].

Ora, si osserva che le tonnellate movimentate dal porto di Buenaventura registrano lo stesso dipartimento della Valle del Cauca come destinazione principale dei viaggi, seguito dal dipartimento di Cundinamarca e Bogotá, anche se è importante ricordare che molte delle merci vengono ridistribuite dalla Valle del Cauca ad altre aree del paese (Fig. 2).

La maggior parte di questo carico viene trasportato su strada (ciò è dovuto all'inattività della Rete Ferroviaria del Pacifico, di cui parleremo più avanti), attraverso un corridoio stradale che presenta una serie di punti critici che ostacolano l'operazione logistica:

- Strade di accesso limitato al porto di Buenaventura.
- Elevati costi di movimentazione.
- Topografia grezza.
- Limitazioni della mobilità.
- Lunghi tempi di carico e scarico.
- Corridoio stradale con punti critici per tutta la sua lunghezza.

Il corridoio stradale tra Buenaventura e Bogotá è quindi lungo 553 km, ma ha ancora diversi ostacoli da superare per migliorare definitivamente il trasporto delle merci, e quindi le prestazioni logistiche e i prezzi di trasporto. Inoltre, ci sono vari problemi sociali e climatici che rendono il corridoio suscettibile di blocco parziale.

Oltre a quanto sopra, sono poche le strade ausiliarie che consentono il transito dei veicoli quando il corridoio è bloccato, soprattutto nel tratto più colpito (Buga-Buenaventura), e le poche che esistono aumentano esponenzialmente il costo del trasporto merci. Questo è il motivo per cui dovrebbe essere ricercata la resilienza del settore del trasporto merci, cercando miglioramenti di efficienza in ciascuna modalità e la diversificazione della matrice modale [6].

cussed later), through a road corridor which has a series of critical points that hinder the logistics operation:

- *Limited access roads to the Port of Buenaventura.*
- *High mobilization costs.*
- *Rough topography.*
- *Limitations in mobility.*
- *Long loading and unloading times.*
- *Road corridor with critical points along its entire length.*

The road corridor between Buenaventura and Bogotá is therefore 553km long, but still has several obstacles to overcome to definitively improve the transport of goods, and thus logistics performance and transport prices. In addition, there are various social and climatic problems which make the corridor susceptible to partial blockage.

In addition to the above, there are few auxiliary roads that allow the transit of vehicles when the corridor is blocked, especially in the most affected section (Buga-Buenaventura), and the few that exist exponentially increase the cost of transport freight. This is why the resilience of the freight transport sector should be sought, seeking efficiency improvements in each mode, and the diversification of the modal matrix [6].

2.4. Railway Mode inc Colombia

Colombia's railway network has a total length of 3,528 km, of which only 1,267 km, about 37%, is in operation. However, the reactivation of the railroad mode may bring advantages in the transportation of heavy industry and high-volume cargo from the production centers to the Pacific and Caribbean ports [9], noting that, despite the state of the railroad network, this mode is the second in cargo transportation in the country after the road mode, mobilizing in 2022 about 30 million tons, mainly of Coal. It is important to mention that, if private railroads are exceptionally considered in the modal share statistics, in the Colombian case,

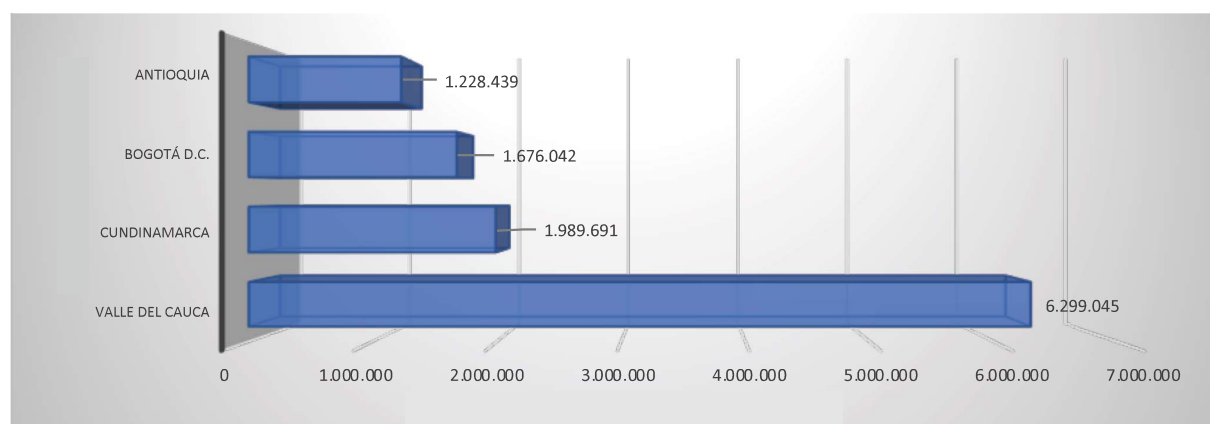


Figura 2 - Tonnellate mobilitate da Buenaventura verso altre destinazioni nel 2023.
Figure 2 - Tons mobilized from Buenaventura towards other destinations in 2023.

2.4. Modo ferroviario in Colombia

La rete ferroviaria della Colombia ha una lunghezza totale di 3.528 km, di cui solo 1.267 km, circa il 37%, è in funzione. Tuttavia, la riattivazione della modalità ferroviaria può portare vantaggi nel trasporto dell'industria pesante e di carichi ad alto volume dai centri di produzione ai porti del Pacifico e dei Caraibi [9], osservando che, nonostante lo stato della rete ferroviaria, questa modalità è la seconda nel trasporto merci nel paese dopo la modalità stradale, movimentando nel 2022 circa 30 milioni di tonnellate, principalmente di carbone. È importante ricordare che, se le ferrovie private sono eccezionalmente considerate nelle statistiche sulla quota modale, nel caso colombiano, Cerrejon (Società dedicata all'estrazione del carbone), il paese raggiungerebbe una quota modale rilevante vicino al 25% [23] (Fig. 3).

Ora, gli investimenti pubblici nella modalità sono diminuiti tra il 2015 e il 2021 dal 2,58% all' 1,08% [23][9]. Questo, insieme all'abbandono generale della rete ferroviaria, colloca la Colombia al di sotto del 98% dei paesi nell'indice di competitività globale nella modalità ferroviaria.

Per questo motivo, lo Stato colombiano ha formulato il Piano Regolatore Ferroviario come strumento di politica pubblica per la riattivazione di questo settore, con l'obiettivo di guidare il quadro costituzionale, normativo e regolamentare della modalità ferroviaria [9]. Uno dei principali corridoi che ha identificato il loro impatto sulla riduzione generalizzata dei costi di trasporto e sulla crescita economica è stata la *Pacific Rail Network* (Corridoio Bogotá Buenaventura) (Fig. 4).

È importante ricordare che esiste un corridoio ferroviario che collegava il porto di Buenaventura con i dipartimenti di Valle del Cauca, Caldas, Quindío e Risaralda per 498 km. Questo corridoio è stato concesso dall'Agenzia Nazionale per le Infrastrutture attraverso il contratto di concessione 09-CONP-98, che era finalizzato al ripristino, alla conservazione, alla gestione e allo sfruttamento dell'infrastruttura di trasporto ferroviario della Rete del Pacifico tra i comuni di Buenaventura - La Felisa e la filiale di Zarzal - La Tebaida - Prominex; oltre al trasferimento del diritto di passaggio di un tratto di linea dalla città di Cali, e alla costruzione, gestione e manutenzione di un terminal di trasferimento merci a La Felisa [30].

La società ha cambiato proprietà fino a quattro volte (l'ultima nel 2016), e sebbene abbia avuto problemi finanziari e operativi sin dalla sua nascita, questi sono stati esacerbati nell'ultimo decennio a tal punto che nell'aprile 2017 la fornitura del servizio e la manutenzione della ferrovia è stata completamente sospesa. Infine, il contratto ha avviato il processo di liquidazione a febbraio. Ciò ha generato il degrado sistematico dell'infrastruttura ferroviaria, a tal punto che oggi è totalmente inattiva, con diverse criticità lungo l'intero tracciato.

Attualmente, e in conformità con la prioritizzazione effettuata nel Piano Regolatore Ferroviario, lo Stato co-

Cerrejon (Company dedicated to coal mining), the country would reach a relevant modal share close to 25% [23] (Fig. 3).

Now, public investment in the mode has decreased between 2015 and 2021 from 2.58% to 1.08% [23][9]. This, coupled with the general abandonment of the rail network, places Colombia below 98% of countries in the global Competitiveness Index in the rail mode.

For this reason, Colombian State formulated the Railway Master Plan as a public policy instrument for the reactivation of this sector, with the objective of guiding the constitutional, normative and regulatory framework of the railway mode [9]. One of the principal corridors that has identified their impact on generalized transportation cost reduction and economic growth was the Pacific Rail Network (Corridor Bogotá Buenaventura) (Fig. 4).

Is important to mention that there is a rail corridor which connected Buenaventura's port with the departments of Valle del Cauca, Caldas, Quindío and Risaralda through 498 km. This corridor was concessioned by the National Infrastructure Agency through concession contract 09-CONP-98, which was aimed at the rehabilitation, conservation, operation and exploitation of the Pacific Network rail transport infrastructure between the municipalities of Buenaventura - La Felisa and the Zarzal - La Tebaida - Prominex branch; in addition to the transfer of the right of way of a section of the line from the city of Cali, and the construction, operation and maintenance of a cargo transfer terminal in La Felisa [30].

The company changed ownership up to four times (the last time in 2016), and although it had financial and operational problems since its inception, these were exacerbated in the last decade to such an extent that in April 2017 the provision of the service and maintenance of the railway was completely suspended. Finally, the contract began the liquidation process in February. This has generated the systematic deterioration of the railway infrastructure, to such an extent that today it is totally inactive, with different critical points along the entire track.

Currently, and in accordance with the prioritization made in the Railway Master Plan, the Colombian state is carrying out the prefeasibility level structuring of the connection between the Port of Buenaventura, Valle del Cauca, in the Colombian Pacific, with the Central Railway network [30]. The consultancy contract is progressing in the definition of the best connection alternative, where they have presented three estimated alternatives of the project's route [25]: i) Option A: La Tebaida, Ibagué and La Dorada (Approx. 600 km), ii) Option B: Zarzal, La Felisa and La Dorada (Approx. 530 km), iii) Option C: La Pintada, Medellín and Puerto Berrio (Approx. 838 km) (Fig. 5).

The state also structured a Public-Private Partnership project for the construction, rehabilitation, improvement, maintenance and operation of the railroad corridor between this municipality and Chiriguana, Cesar, over a distance of 522 kilometers (part of the currently active network), which is expected to be awarded in 2024.

lombiano sta effettuando la strutturazione del livello di prefattibilità del collegamento tra il Porto di Buenaventura, Valle del Cauca, nel Pacifico colombiano, con la Rete Ferroviaria Centrale [30]. Il contratto di consulenza sta procedendo nella definizione della migliore alternativa di connessione, dove sono state presentate tre alternative stimate del percorso del progetto [25]: i) Opzione A: La Tebaida, Ibagué e La Dorada (circa 600 km), ii) Opzione B: Zarzal, La Felisa e La Dorada (circa 530 km), iii) Opzione C: La Pintada, Medellín e Puerto Berrio (circa 838 km) (Fig. 5).

Lo stato ha anche strutturato un progetto di partenariato pubblico-privato per la costruzione, la riabilitazione, il miglioramento, la manutenzione e il funzionamento del corridoio ferroviario tra questo comune e Chiriguana, Cesar, su una distanza di 522 chilometri (parte della rete attualmente attiva), che dovrebbe essere assegnato nel 2024.

2.5. Riduzioni stimate delle emissioni di CO₂ attraverso il passaggio dalla modalità stradale a quella ferroviaria

Considerando il contesto presentato in questo documento, è stata condotta un'indagine su come sono state effettuate le stime di riduzione delle emissioni di gas serra attraverso il trasferimento modale nel trasporto merci. A fronte di ciò, si osserva che negli ultimi anni sono state effettuate analisi delle emissioni di carbonio in varie modalità di trasporto come ferrovie, trasporti terrestri, vie navigabili interne e aviazione civile, concentrandosi su ciascun settore singolarmente (Jiang, et al., 2024), dove si osserva che il progresso della riduzione delle emissioni nel settore dei trasporti è stato più lento rispetto ad altri settori [31].

Un metodo [32] proposto per stimare le emissioni di CO₂ dal trasporto nelle città europee; [33] ha esplorato il potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ nel settore dei trasporti cinese tra il 1991 e il 2015; [34] ha stimato i potenziali benefici dello scambio di emissioni di CO₂ nell'industria dei trasporti cinese; [35] ha impiegato algoritmi di apprendimento automatico per prevedere le emis-



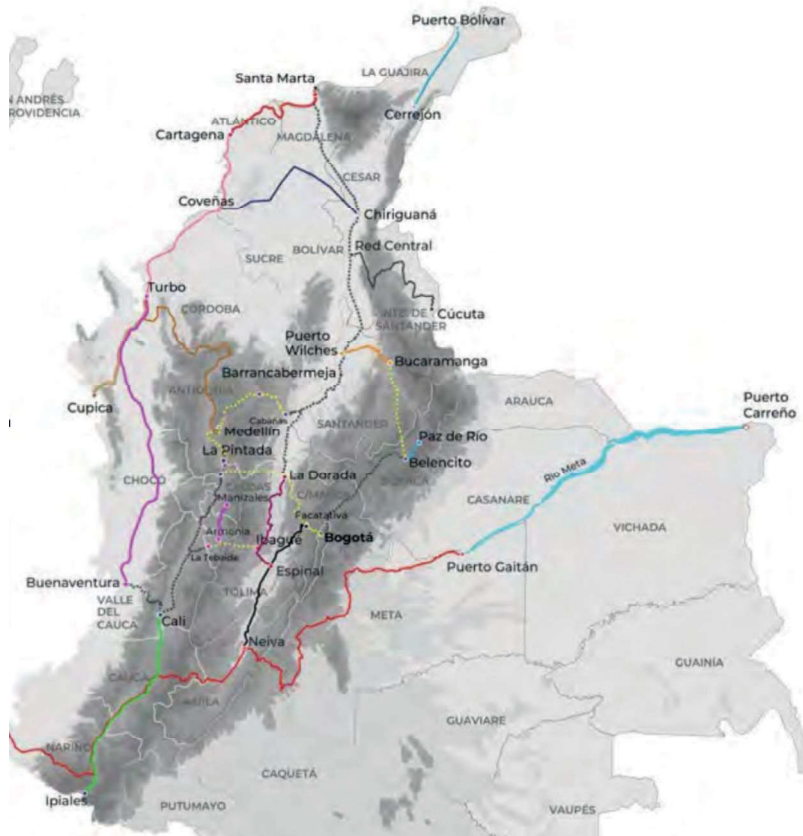
(Fonte - Source: Piano Regolatore Ferroviario - Railway Master Plan)

Figura 3 - Rete Ferroviaria della Colombia, le sezioni inattive sono mostrate in blu scuro, la Rete Ferroviaria del Pacifico in blu chiaro, la Rete Ferroviaria Chiriguana-Sanra Mara in verde scuro, la Rete Ferroviaria Cerrejón in verde chiaro e la Rete Ferroviaria Centrale in giallo.

Figure 3 - Rail Network of Colombia, inactive sections are shown in dark blue, Pacific Rail Network in light blue, Chiriguana-Sanra Mara railway network in dark green, Cerrejón railway network in light green and central railway network in yellow.

2.5. Estimated CO₂ emission reductions through the change from road to rail mode

Considering the context presented in this document, an investigation was conducted on how GHG emission reduction estimates have been made through modal shift in



(Fonte - Source: Cambio Colombia)

Figura 4 - Layout concettuale della rete ferroviaria colombiana nel 2050, i diversi colori indicano due corridoi esistenti e pianificati.

Figure 4 - Conceptual layout of Colombia's railroad network in 2050, the different colors indicate two existing and planned corridors.

sioni di CO₂ nel settore dei trasporti della Turchia; [36] ha presentato un'analisi delle tendenze delle emissioni di CO₂ dei trasporti in 29 paesi eurasiatici; e [37] il sistema integrato MARKAL-EFOM1 (TIMES) al fine di identificare i collegamenti tra tutte le modalità di trasporto, stimando in modo più accurato il potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ nel settore dei trasporti cinese.

Ora, [38] ha proposto una metodologia per eseguire la stima delle emissioni di gas serra nel trasporto merci attraverso il passaggio dalla modalità di trasporto terrestre a quella fluviale o ferroviaria da un punto di origine A a un punto di destinazione B in base al consumo di carburante utilizzato per trasportare tale carico, comprese le modalità di trasporto complementari ma escluse le rotte degli impianti di produzione in cui viene prodotto il carico. Per la semplificazione dello strumento, questa metodologia include solo CO₂ come fonte di emissione, escludendo CH₄ e N₂O.

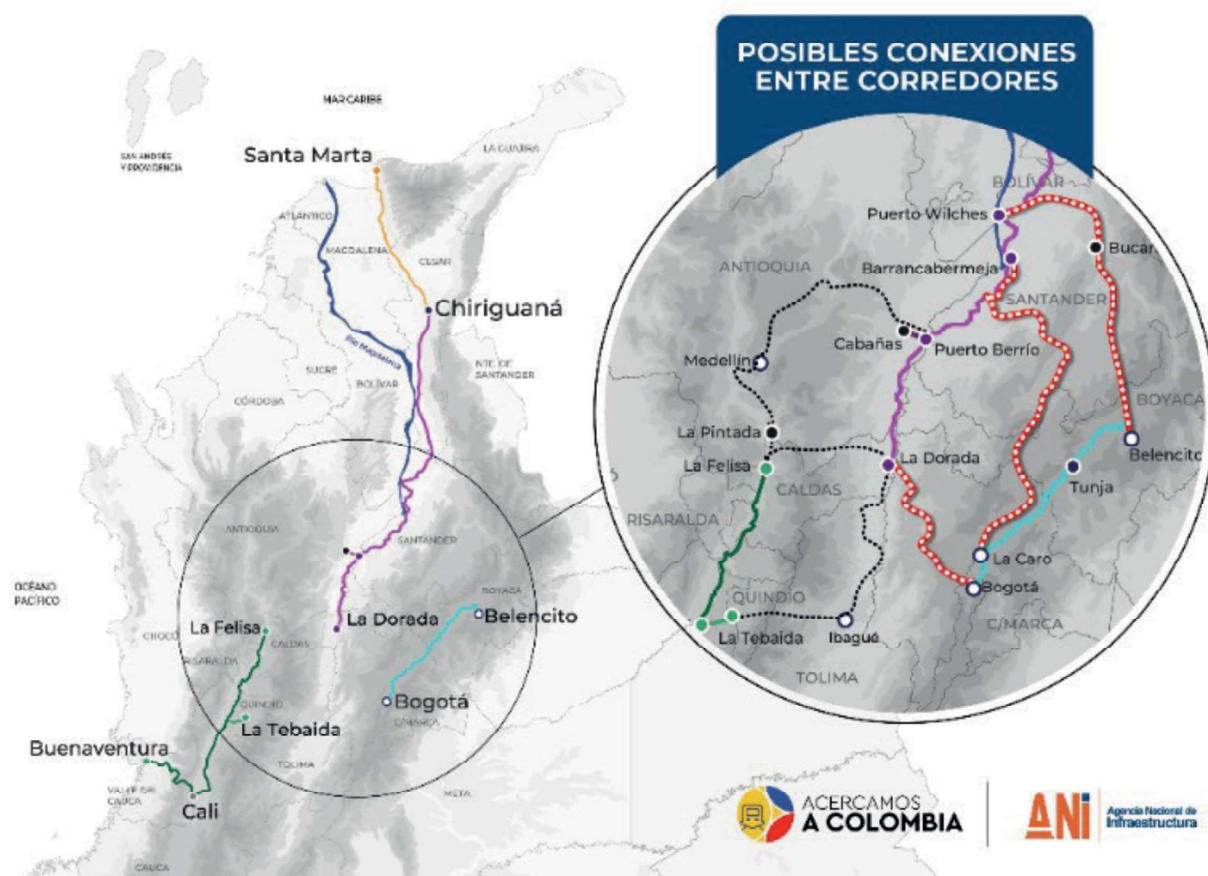
freight transportation. Against this, it is observed that in recent years, carbon emissions analyses have been carried out in various modes of transport such as railroads, land transport, inland waterways and civil aviation, focusing on each sector individually (Jiang, et al., 2024), where it is observed that the progress of emissions reduction in the transport sector has been slower compared to other sectors [31].

A [32] proposed a method to estimate CO₂ emissions from transport in European cities; [33] explored the CO₂ emission reduction potential in China's transportation sector between 1991 and 2015; [34] estimated the potential benefits of CO₂ emissions trading in China's transportation industry; [35] employed machine learning algorithms to predict CO₂ emissions in Turkey's transportation sector; [36] presented an analysis of transportation CO₂ emission trends in 29 Eurasian countries; and [37] the integrated MARKAL-EFOM1 (TIMES) system in order to identify the linkages between all transport modes, more accurately estimating the CO₂ emission reduction potential, in China's transport sector.

Now, [38] proposed a methodology to perform the estimation of GHG emissions in freight transportation through the change from land to river or rail transport mode from a point of origin A to a point of destination B

according to the fuel consumption used to transport such cargo, including complementary modes of transport but not including the routes of the production facilities where the cargo is produced. This methodology only includes CO₂ as an emission source, excluding CH₄ and N₂O for simplification of the tool.

The [39] also proposes a methodology for calculating emissions from the use of fossil fuels in a route or project, which can be used in cases where the CO₂ emissions generated by the use of these fuels are calculated based on the amount of fuel used and the specific properties of the fuel. However, for the railway mode [40] presents a tool for the conversion of freight demand volumes into supply units, offering additional results such as energy (fuel) consumption and associated operating costs, which is useful for estimating the CO₂ emissions of a railway route through the energy consumption used per volume of cargo transported.



(Fonte - Source: ANI)

Figura 5 - Alternative di percorso per collegare la Rete Ferroviaria del Pacifico con la Rete Ferroviaria Centrale, la Rete Ferroviaria del Pacifico in verde scuro, la Rete Ferroviaria Centrale in rosa, alternative per diversi collegamenti tra Bogotá e la rete centrale in rosso e alternative di collegamento tra la rete del Pacifico e la rete centrale in grigio.

Figure 5 - Route alternatives for connecting the Pacific Railroad Network with the Central Railroad Network, the Pacific railway network in dark green, the central railway network in pink, alternatives for different connections between Bogotá and the central network in red and connection alternatives between the Pacific network and the central network in grey.

La [39] propone anche una metodologia per calcolare le emissioni derivanti dall'uso di combustibili fossili in un percorso o progetto, che può essere utilizzata nei casi in cui le emissioni di CO₂ generate dall'uso di questi combustibili sono calcolate in base alla quantità di combustibile utilizzato e alle proprietà specifiche del combustibile. Tuttavia, per la modalità ferroviaria [40] presenta uno strumento per la conversione dei volumi di domanda di merci in unità di offerta, offrendo risultati aggiuntivi come il consumo di energia (carburante) e i costi operativi associati, che è utile per stimare le emissioni di CO₂ di un percorso ferroviario attraverso il consumo di energia utilizzato per volume di carico trasportato.

3. Methodology and results

3.1. Objectives and hypotheses

The objective of this article is to estimate the reduction of Greenhouse Gas (GHG) emissions that would result from the implementation of the railroad project connecting the Port of Buenaventura and the Central Railroad network, by switching cargo transportation from road transport, in the section between Buenaventura and the Bogotá-Cundinamarca region, to rail transport.

The main hypothesis is based on the Colombian state's interest in the recovery of the corridor, through which they are currently carrying out the pre-feasibility level structuring of the connection between the Port of Buenaventura, Valle

3. Metodologia e risultati

3.1. Obiettivi e ipotesi

L'obiettivo di questo articolo è stimare la riduzione delle emissioni di gas serra (GHG) che deriverebbe dall'attuazione del progetto ferroviario che collega il porto di Buenaventura e la Rete Ferroviaria Centrale, passando dal trasporto merci su strada, nella sezione tra Buenaventura e la regione di Bogotá-Cundinamarca, al trasporto ferroviario.

L'ipotesi principale si basa sull'interesse dello stato colombiano per il recupero del corridoio, attraverso il quale stanno attualmente effettuando la strutturazione a livello di prefattibilità del collegamento tra il porto di Buenaventura, Valle del Cauca, nel Pacifico colombiano, con la Rete Ferroviaria Centrale. Il contratto di consulenza sta procedendo nella definizione della migliore alternativa di connessione, dove sono state presentate tre alternative stimate del percorso del progetto (Fig. 6):

- Opzione A: La Tebaida, Ibagué e La Dorada.
- Opzione B: Zarzal, La Felisa e La Dorada.
- Opzione C: La Pintada, Medellín e Puerto Berrio.

Considerando quanto sopra, la lunghezza del progetto è stata calcolata per le tre alternative presentate dall'entità, risultando in: 599 km per l'opzione A, 530 km per l'opzione B e 838 km per l'opzione C. Ora, secondo il contratto di consulenza firmato tra l'Agenzia Nazionale per le Infrastrutture e il Finanziamento per lo Sviluppo Nazionale della Colombia, e poiché attualmente non esiste un binario ferroviario tra le alternative menzionate, che gran parte della rete esistente della vecchia ferrovia del Pacifico non viene utilizzata a causa dei parametri di quella esistente con rampe massime e radio curvatura che non consentirebbero un adeguato funzionamento commerciale e che le locomotive e il materiale rotabile esistenti utilizzati nel corridoio sono ora in stato di abbandono, sono stati assunti i seguenti componenti per l'operazione, per un'analisi adeguata e per facilità di raccolta delle informazioni:

- Rampa massima: 15 mm/m.
- Velocità operativa: 80 km/h.
- Locomotiva: Serie 333.3 Vossloh Diesel.
- Rimorchio piattaforma: MM2Q.
- Lunghezza massima del treno: 600 m.

Tuttavia, il confronto delle emissioni sarà effettuato sulla rotta Buenaventura e la regione di Bogotá-Cundinamarca, poiché è uno dei principali corridoi logistici del paese, che collega i porti del Pacifico con l'interno e la capitale della Colombia (Fig. 7). Allo stesso modo, come si può vedere nella Fig. 4, la regione è la destinazione con le rotte più specifiche dal porto di Buenaventura, superata solo dal dipartimento della Valle del Cauca.

Tuttavia, il dipartimento della Valle del Cauca non è rappresentativo dello studio, principalmente perché non

del Cauca, in the Colombian Pacific, with the Central Railway network. The consultancy contract is progressing in the definition of the best connection alternative, where they have presented three estimated alternatives of the project's route (Fig. 6):

- Option A: La Tebaida, Ibagué and La Dorada.
- Option B: Zarzal, La Felisa and La Dorada.
- Option C: La Pintada, Medellín and Puerto Berrio.

Considering the above, the length of the project was calculated for the three alternatives presented by the entity, resulting in: 599 km for option A, 530 km for option B, and 838 km for option C. Now, according to the consulting contract signed between the National Infrastructure Agency and Colombia's National Development Finance, and since there is currently no railroad track between the alternatives mentioned, that a large part of the existing network of the old Pacific railroad is not used due to the parameters of the existing one with maximum ramps and curvature radio that would not allow for adequate commercial operation, and that the existing locomotives and rolling stock that were used in the corridor are now in a state of abandonment, for an adequate analysis and for ease of information gathering, the following components have been assumed for the operation:

- Maximum Ramp: 15mm/m.
- Operating speed: 80km/hr.
- Locomotive: 333.3 Series Vossloh Diesel.
- Platform Wagon: MM2Q.
- Maximum Train Length: 600 m.

However, the comparison of emissions will be made on the Buenaventura route and the Bogota-Cundinamarca Region, since it is one of the main logistic corridors in the country, connecting the Pacific ports with the interior and the capital of Colombia (Fig. 7). Likewise, as can be seen in Fig. 4, the region is the destination with the most specific routes from the Port of Buenaventura, only surpassed by the department of Valle del Cauca.

However, the department of Valle del Cauca is not representative for the study, mainly because it is not the destination of the cargo, and most of it is redistributed to the rest of the country. Likewise, the comparison will be made with respect to the cargo mobilized during the year 2022, because at the time of the study the information for the year 2023 is still in the process of being compiled, and the immediately preceding years may present unusual behaviours because of the pandemic caused by the COVID-19 disease [41].

3.2. Techniques and methodologies

The methodology used for the calculation of emissions reduction is based on the tool "Modal shift in transportation of cargo from road transportation to water or rail transportation" approved by the CDM, this through the formula:

è la destinazione del carico e la maggior parte è ridistribuita al resto del paese. Allo stesso modo, il confronto sarà effettuato rispetto al carico movimentato durante l'anno 2022, perché al momento dello studio le informazioni per l'anno 2023 sono ancora in fase di compilazione e gli anni immediatamente precedenti possono presentare comportamenti insoliti a causa della pandemia causata dalla malattia COVID-19 [41].

3.2. Tecniche e metodologie

La metodologia utilizzata per il calcolo della riduzione delle emissioni si basa sullo strumento "Modal shift in transportation of cargo from road transport to water or rail transport" (Spostamento modale nel trasporto delle merci dal trasporto su strada a quello fluviale o ferroviario) approvato dal CDM, questo attraverso la formula:

$$ER_y = BE_y - PE_y \quad (\text{eq. 1})$$

In cui:

ER_y = Riduzioni delle emissioni nell'anno y (tCO_2).

BE_y = Emissioni di riferimento nell'anno y (tCO_2).

PE_y = Emissioni di progetto nell'anno y (tCO_2).

Secondo la suddetta metodologia, l'equazione per il calcolo delle emissioni di base è:

$$BE_y = T_y \cdot AD \cdot EF_y \cdot 10^{-6} \quad (\text{eq. 2})$$

In cui:

BE_y = Emissioni di riferimento nell'anno y (tCO_2).

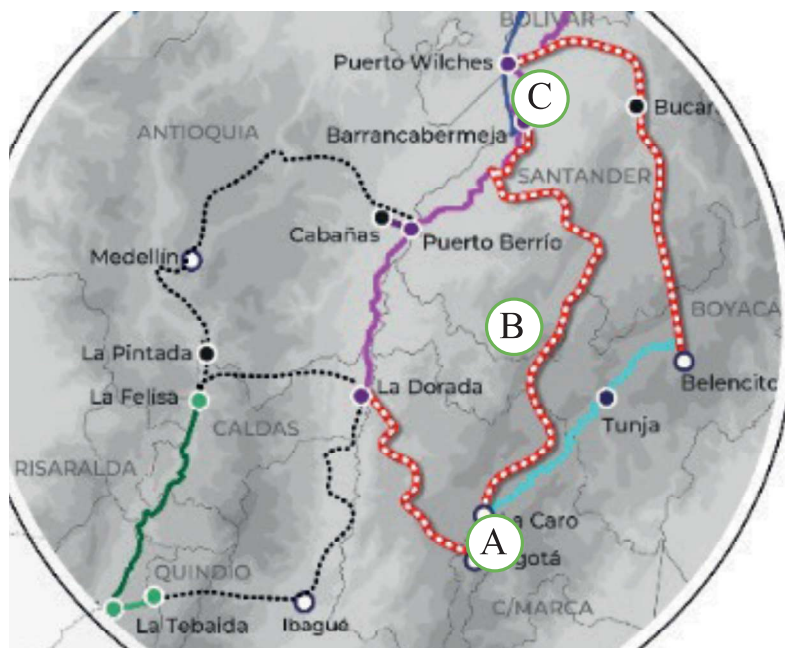
T_y = Quantità di carico trasportata dalla modalità di trasporto del progetto nell'anno y (tonnellate).

AD = Distanza del percorso di viaggio di base (km).

EF_y = Fattore di emissione di base per il trasporto del carico (gCO_2 per t-km, cioè gCO_2 per tonnellata di carico e km percorsi).

Il carico trasportato nello scenario di base tra origine e destinazione è fornito dalla commissione di controllo del portale logistico colombiano del Ministero dei Trasporti colombiano, dove il carico trasportato origine-destinazione tra Buenaventura e la regione di Bogotá-Cundinamarca nel 2022 è come da Fig. 8.

Allo stesso modo, la configurazione del convoglio per il carico trasportato durante quell'anno tra Buenaventura e Bogotá era come da Fig. 9.



(Fonte - Source: ANI)

Figura 6 - Alternative di collegamento studiate; la Rete Ferroviaria del Pacifico in verde scuro, la Rete Ferroviaria Centrale in rosa, alternative per diversi collegamenti tra Bogotá e la rete centrale in rosso e alternative di collegamento tra la rete del Pacifico e la rete centrale in grigio.

Figure 6 - Connection alternatives studied; the Pacific railway network in dark green, the central railway network in pink, alternatives for different connections between Bogotá and the central network in red and connection alternatives between the Pacific network and the central network in grey.

$$ER_y = BE_y - PE_y \quad (\text{eq. 1})$$

Where:

ER_y = Emission reductions in year y (tCO_2)

BE_y = Baseline emissions in year y (tCO_2)

PE_y = Project emissions in year y (tCO_2)

According to the aforementioned methodology, the equation for calculating baseline emissions is:

$$BE_y = T_y \cdot AD \cdot EF_y \cdot 10^{-6} \quad (\text{eq. 2})$$

where:

BE_y = Baseline emissions in year y (tCO_2).

T_y = Amount of cargo transported by the project transportation mode in year y (tonne).

AD = Distance of the baseline trip route (km).

EF_y = Baseline emission factor for transportation of cargo (gCO_2 per t-km, i.e. gCO_2 per tonne of cargo and km travelled).

The cargo transported in the base scenario between origin and destination is provided by the control board of the Colombian Logistics Portal of the Colombian Ministry of



Figura 7 - Corridoio stradale Regione Bogotá-Porto di Buenaventura, i colori indicano le diverse concessioni del corridoio stesso.

Figure 7 - Road corridor Bogotá Region-Port of Buenaventura, the colors indicate the different concessions of the corridor itself.

in cui:

- 3S: trattore-rimorchio a tre assi (35 t).
- 2S: trattore-rimorchio a due assi (22 t).
- C2: autocarro rigido a due assi (8 t).
- Altri tipi di autocarri più piccoli.

e il carico trasportato da Bogotá e Cundinamarca a Buenaventura con destinazione Buenaventura nel 2022 è come da Fig. 10:

La configurazione del convoglio per il carico trasportato durante quell'anno tra Buenaventura e la regione di Bogotá-Cundinamarca è come da Fig. 11.

Il totale delle merci trasportate nel 2022 è stato di 4.908.174 tonnellate. La distanza origine-destinazione è il corridoio stradale tra Bogotá e Buenaventura (Tab. 1).

Per il fattore di emissione (Tab. 2) del trasporto merci sono stati utilizzati i valori determinati secondo (UPME & U DE ANTIOQUIA, 2021).

Per calcolare le emissioni stimate generate dal funzionamento del progetto, è importante ricordare che per le opzioni A e B il comune di collegamento con la Rete Ferroviaria Centrale è il comune di La Dorada, Caldas, e da lì il carico viaggerà verso la regione di Bogotá su strada per oltre 189 km. Per l'opzione C, il comune di collegamento sarebbe Puerto Berrio, oltre 350 km.

Si presume che il carico verrà spostato con una distribuzione del carico simile nella tipologia di veicolo presentata sopra. Le emissioni generate dal percorso ferroviario sono stimate utilizzando [42], con la formula:

Transportation, where the cargo transported origin-destination between Buenaventura and the Bogotá-Cundinamarca region in 2022 is as in Fig. 8.

Likewise, the vehicle configuration of the cargo transported during that year between Buenaventura and Bogotá was as in Fig. 9.

Where:

- 3S: three-axle tractor-trailer (35 ton).
- 2S: two-axle tractor-trailer (22 ton).
- C2: two-axle rigid truck (8 ton).
- Other types of smaller trucks.

And the cargo transported from Bogotá and Cundinamarca to Buenaventura with destination Buenaventura in 2022 is in Fig. 10.

The vehicle configuration of the cargo transported during that year between Buenaventura and the Bogotá-Cundinamarca region was as in Fig. 11.

Total cargo transported in 2022 was 4,908,174 tons. The origin-destination distance is the road corridor between Bogotá and Buenaventura (Tab. 1).

For the freight transportation emission factor, the values determined according to (UPME & U DE ANTIOQUIA, 2021) were used (Tab. 2).

To calculate the estimated emissions generated by the operation of the project, it is important to mention that for options A and B the connection municipality with the Central Rail Network is the municipality of La Dorada, Caldas, and from there the cargo will travel to Bogotá-Region by road