

Ongelijkheid in blootstelling aan natuurlijke gevaren in Colombia

Mattias van Ingen



Datum:	26 juni 2026
Opleiding:	Aarde, Economie en Duurzaamheid (BSc)
Afdeling:	Ruimtelijke Economie, Bètawetenschappen, VU Amsterdam
Begeleider:	Eric Koomen
Tweede beoordelaar:	Maureen Lankhuizen
Studentnummer:	2815599

Abstract

Colombia is een land met veel uitdagingen in zowel sociale ongelijkheid als natuurrampen. Dit onderzoek dient om vier vormen van natuurlijke gevaren in kaart te brengen, en om dit in verband te trekken met sociale ongelijkheid. Het doel is om een verband te vinden tussen welvaart en blootstelling aan natuurlijke gevaren. Hierbij wordt nieuwe, innovatieve data gebruikt die ruimtelijke verschillen in welvaart weergeeft. Door middel van een GIS-analyse is er geanalyseerd of mensen in een lagere welvaartsklasse meer blootstelling kregen aan overstromingen, aardbevingen, aardverschuivingen, en tropische cyclonen. Uit deze analyse is gebleken dat er voor Colombia meer blootstelling is aan aardverschuivingen en overstromingen bij gebieden met lagere welvaart. Er is geen duidelijke correlatie gevonden tussen welvaart en blootstelling aan aardbevingen en tropische cyclonen, maar ook deze gevaren kunnen ongelijkheid in de hand werken via secundaire rampen. Deze bevindingen suggereren dat er maatregelen getroffen kunnen worden om deze ongelijkheid kleiner te krijgen.

1. Probleemstelling

Een goed vastgelegd fenomeen is dat, over het algemeen, armere mensen meer blootgesteld zijn aan natuurrampen (Kim, 2012) en er kwetsbaarder voor zijn (Yoon, 2012). Dit presenteert zichzelf op drie manieren (Anderson, 2000). De eerste is dat mensen in armere gebieden minder goede bescherming hebben tegen rampen, omdat de leefomstandigheden slechter zijn. Dit zorgt voor minder weerstand, waardoor er meer kans is op doden en gewonden. Dit zorgt er tegelijkertijd voor dat armere gebieden arm blijven, zoals beschreven door het UNDRR (2009). De tweede manier is dat mensen in armere gebieden achterblijven bij hulp tijdens een grote natuurramp, zoals een overstroming. Dit wordt beschreven door Chan en Parker (1996), die benoemen dat armere gebieden vaak niet worden gewaarschuwd in het geval van een aankomende natuurramp. Als laatste manier gaat het om de regio en plek waar mensen wonen. In landen met een grote ongelijkheid wordt vaak gezien dat armere mensen wonen op plekken met een hoger risico op natuurrampen (Kapuka & Hlásny, 2020). Hierdoor hebben mensen met een lage welvaart structureel meer kans op natuurlijke gevaren. Dit onderzoek zal zich vooral focussen op de laatste manier, waarbij de relatie tussen armoede en blootstelling wordt onderzocht.

Er is veel literatuur die de verbinding tussen welvaart en risico beschrijft (Chan & Parker, 1996; Fothergill & Peek, 2004; Arouri et al., 2015), maar er is geen literatuur die de correlatie beschrijft met data op fijne ruimtelijke schaal. Dit komt omdat er in het verleden weinig tot geen data beschikbaar was over de verdeling van welvaart, of omdat de data slechts op districtniveau beschikbaar is (Ahmed et al., 2019; Trogrlić et al., 2024). In 2021 is er een team van onderzoekers bezig geweest om de relatieve welvaart van midden- en laaginkomensgebieden vast te leggen door middel van satellietbeelden en verbondenheid met sociale media (Chi et al., 2022), en de data is in 2023 geüpdatet. Dit heeft gezorgd voor een hoge resolutiekaart over ruimtelijke welvaartsverdeling. Mijn onderzoek zal deze data over welvaart combineren met data over natuurrampen en bevolkingsverdeling om te kijken of armere mensen in Colombia meer kans op of blootstelling aan natuurrampen hebben, voor welke natuurrampen dit het meeste geldt, en welke gebieden het meeste risico hebben op natuurrampen.

De onderzoeksvraag die beantwoord gaat worden in deze paper, is: **In hoeverre is er een verschil in blootstelling aan natuurrampen tussen verschillende welvaartsgroepen in Colombia?**

Hierbij horen een aantal deelvragen die relevant zijn om de onderzoeksvraag te beantwoorden.

‘Welke natuurrampen laten het meeste verschil zien in blootstelling naar welvaartsniveaus?’ dient om te kijken welk gevaar het meest relevant is. Dit wordt gedaan met behulp van analyse via Qgis.

‘Is dit verschil statistisch significant?’ zal gebruikt worden om te bewijzen dat een trend standhoudt, en wordt beantwoord met het uitvoeren van een regressie. ‘Hoe wordt een eventueel verschil in blootstelling teruggekoppeld op de lokale sociale context?’ zal beantwoord worden om te kijken hoe relevant deze vraag is voor de huidige situatie, en zal beantwoord worden aan de hand van literatuur.

Dit onderzoek is een case study voor Colombia. De ruimtelijke welvaartsdata van Chi et al. (2022) is een zeer innovatieve bron van data, en dit onderzoek zal een van de eerste studies zijn waarbij deze data gebruikt wordt om het verschil in natuurrampen mee te laten zien. Het gekozen gebied hiervoor is Colombia, omdat er een hoge gini-index in dit land is (World Bank Group, 2024a), wat betekent dat er veel inkomensongelijkheid is. World Bank Group laat ook zien dat 30% van de bevolking onder de nationale armoedegrens leeft. Daarbij zijn er veel verschillende soorten natuurrampen in dit land, wat het interessant maakt om met verschillende soorten gevaren een analyse te maken.

Om ervoor te zorgen dat er een eenduidige overeenkomst bestaat over de volgende definities, is er in tabel 1 een begrippenlijst te vinden die terugkerende begrippen uitlegt. Deze begrippenlijst is opgesteld met hulp van een artikel van PreventionWeb (2025).

Tabel 1: Overzicht van termen zoals ze gebruikt worden in deze scriptie.

Begrip	Uitleg
Natuurramp	Populaire term om een gebeurtenis van natuurlijke oorzaak met grote gevolgen voor mens of natuur aan te duiden.
(Natuurlijk) gevaar	Gevaar dat voortkomt uit natuurlijke processen, zoals aardbevingen of overstromingen, met genoeg destructieve kracht om mens of natuur in gevaar te brengen.
Blootstelling	Mensen, natuur, of andere zaken van waarde die zich in een gebied met natuurlijke gevaren bevinden.
Kwetsbaarheid	Mate van weerstand tegen een gevaar. Een slecht gebouwd huis is kwetsbaarder dan een huis met goede fundering. Ook armere bevolkingsgroepen zijn over het algemeen kwetsbaarder voor gevaren.
Risico	Gevaar * Blootstelling * Kwetsbaarheid. Een hoog risico betekent een plek waar gevaar, blootstelling en kwetsbaarheid samenkomen.
Herhalingsperiode	Een geschatte tijd waarin een event met bepaalde intensiteit zich herhaalt.

1.1. Relevantie

Dit onderzoek valt samen met SDG's (Sustainable Development Goals) 10 en 11. SDG 10, “Reduced Inequalities”, wil de ongelijkheden tussen mensen en binnen landen verminderen. Hierbij wordt ook expliciet aandacht gegeven aan ongelijkheid door klimaatverandering. SDG 11,

“Sustainable Cities and Communities”, waarbij ook expliciet aandacht wordt gegeven aan het verminderen van het risico op natuurrampen.

Er is in Colombia sprake van een grote regionale ongelijkheid, die groter is dan de meeste landen in Latijns-Amerika (OECD, 2014). Zo hebben 55% van de Colombiaanse inwoners in rurale gebieden geen of gelimiteerde toegang tot basisbehoeften, tegenover slechts 20% in stedelijke gebieden (Duque et al., 2023). Dit betekent dat rurale gebieden, waar mensen vaak al armer zijn (Chi et al., 2022), ook een stuk kwetsbaarder zijn voor natuurrampen. Dit onderzoek kan helpen met het identificeren en kwantificeren van de problemen waar deze armere groepen tegenaan lopen.

2. Methode

In deze sectie wordt besproken hoe de analyse is uitgevoerd, en wordt er ingegaan op hoe de data is verkregen en verwerkt. Voor een overzicht van de spreiding van de gebruikte gevaren, zie figuren 1 en 2.

2.1. Gevaren en classificatie

In dit onderzoek zullen vier natuurlijke gevaren worden geanalyseerd, namelijk aardverschuivingen, aardbevingen, overstromingen, en tropische cyclonen. Er is gestreefd om, voor zover mogelijk, data te pakken met een herhalingsstijd van 100 jaar, zodat het gevaar gelijkstaat aan een gebeurtenis dat één keer in een leven gebeurt. Al deze gevaren zijn als kaarten weer te geven in geographische analyse software (GIS), wat ook de software is die gebruikt zal worden om deze analyse te doen. Om later in de analyse te kwantificeren hoeveel blootstelling verschillende welvaartsgroepen hebben, wordt het gevaar opgedeeld in classificaties van laag gevaar, middelhoog gevaar en hoog gevaar. De manier waarop ik dat doe zal ook te lezen zijn in deze sectie.

Als eerste worden aardverschuivingen geanalyseerd. De hiervoor gebruikte data komt van de World Bank Group (2025). Deze data combineert data over topografie, bijvoorbeeld op welke helling bomen zijn gekapt, of waar de bedrock slap is, met data over regen en aardbevingen. Het resultaat is een kaartlaag die aangeeft hoe groot de kans per jaar is dat zich een significante aardverschuiving ($>1000 \text{ m}^2$) voordoet. Classificaties hiervoor zijn gegeven door dezelfde onderzoekers die de data hebben samengesteld (World Bank Group, 2025). Een lage kans is wanneer een aardverschuiving minder dan eens in de 1000 jaar voorkomt. Een middelhoge kans is wanneer een aardverschuiving tussen de 100 en 1000 jaar voorkomt. Een hoge kans is als een aardverschuiving meer dan eens per 100 jaar zich voordoet. Er is echter geen sprake van een lage kans in de dataset, waardoor er in deze analyse alleen maar middelhoge en hoge kans meegenomen wordt.

Als tweede worden aardbevingen meegenomen. De data voor aardbevingen komt van de Global Earthquake Model (Johnson et al., 2023). Deze bron heeft als open data een kaart van de PGA (peak ground acceleration) uitgedrukt in g-kracht, met een herhalingsstijd van 50 jaar, en een kans van 10% op overschrijding van deze waarde. De metadata geeft aan dat de resolutie ongeveer gelijk is aan 6 vierkante kilometer per pixel. Bij aardbevingen wordt een classificatie gegeven door Dai et al. (2019). Zij identificeren een threshold als 0,2 PGA voor lichte schade, wat door mij als laag gevaar zal worden gezien. 0,35g is volgens hun onderzoek een threshold vanaf waar er zware schade kan voorkomen, wat door mij als middelhoog gevaar zal worden gezien. 0,5g beschouwen zij als een

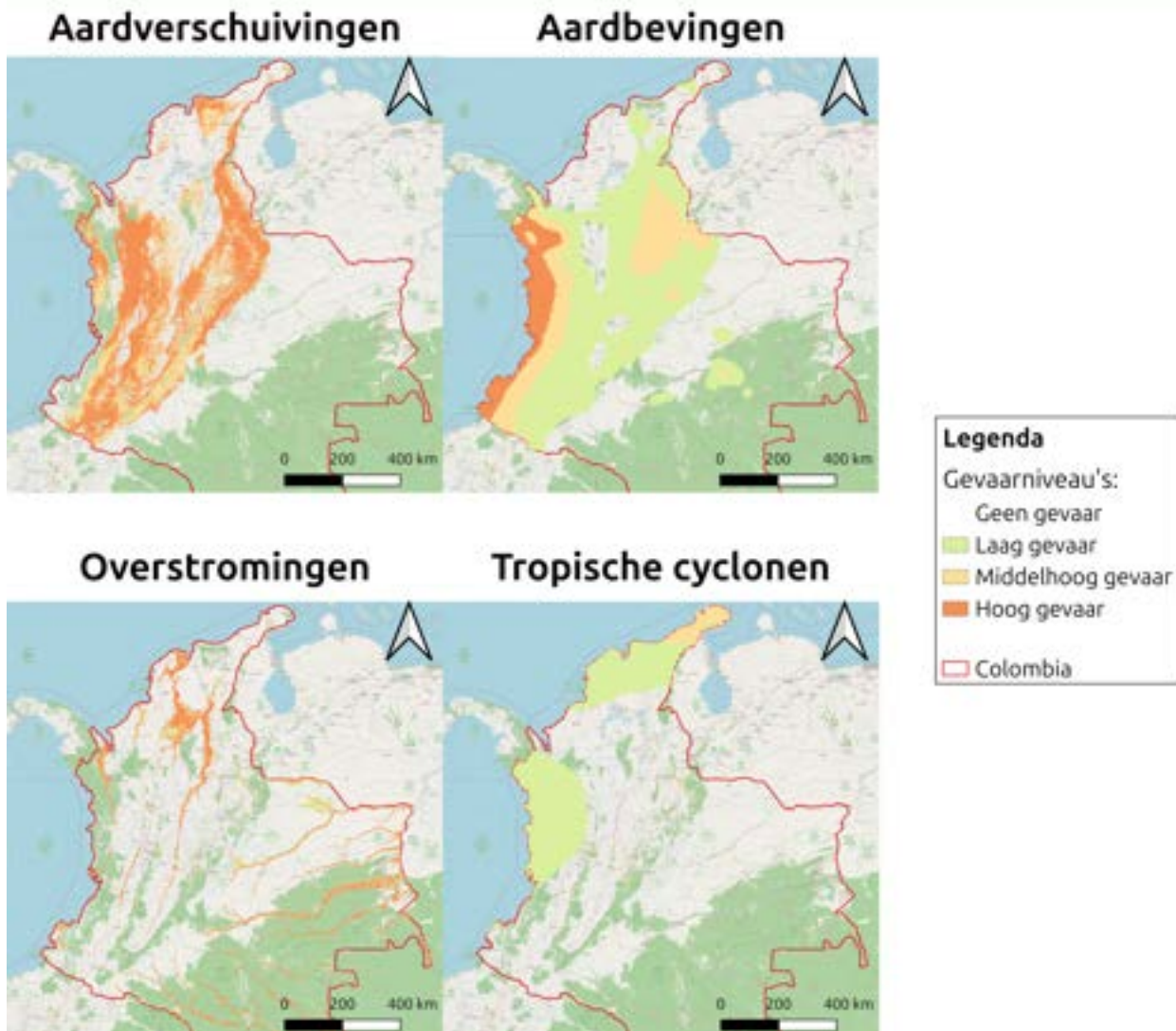
threshold voor hoog gevaar. Deze waarden zijn voortgekomen uit een wereldwijde studie over de correlatie tussen PGA en schade aan gebouwen en infrastructuur.

Als derde worden rivieroverstromingen geanalyseerd. De data die hiervoor wordt gebruikt, is de globale rivieroverstromingsdata van het Europese JRC-platform, gemaakt door Baugh et al. (2026). De gebruikte herhalingsperiode is 100 jaar. De kaart heeft een resolutie van 30 arcseconden, of ongeveer 900 bij 900 meter op de evenaar. Deze kaart is tot stand gekomen door data te combineren over historische debieten en geografische data om flood extent maps te maken. Er zal geen grenswaarde worden gehanteerd voor dit gevaar, omdat elke vorm van overstroming al schadelijk kan zijn (Koomen et al., 2026). Bij overstromingen is een classificatiesysteem beschreven door Moya Quiroga et al. (2016). Zij classificeren een inundatiediepte van minder dan 1 meter als laag gevaar, 1-2 meter als middelhoog gevaar, en boven de 2 meter als hoog gevaar. Dit is gebaseerd op overstromingen in Bolivia, waar onderzoek is gedaan naar de grootte van overstromingsgevaar. Omdat dit onderzoeksgebied goed aansluit op ons onderzoeksgebied, is er besloten om deze classificatie over te nemen.

Als laatste zal de blootstelling aan tropische cyclonen meegenomen worden. De hiervoor gebruikte data is gecompileerd door Meiler (2026) met behulp van het CHAZ-model, dat aan de hand van ruimtelijke factoren tropische cyclonen simuleert. Hier maak ik gebruik van het basismodel, dat de data compileert van 1995 tot 2014, met een herhalingsperiode van 100 jaar. De eenheid van de kaart is windsnelheid in meter per seconde. De data heeft een resolutie van 300 arcseconden, ongeveer 9 kilometer aan de evenaar. Om dit te classificeren, wordt de schaal van Saffir-Simpson gebruikt (Simpson & Saffir, 1974). In de data voor Colombia is er sprake van een aantal punten boven de 32,5 m/s, wat de grenswaarde is voor een tropische cycloon. De pixels tussen 17,5 en 32,5 m/s staan gelijk aan een tropische storm, wat voor ons als laag risico wordt beschouwd. Waarden boven de 32,5 zullen middelhoog risico zijn, wat overeenkomt met een waarde van 1 op de schaal van Saffir-Simpson. Door gebrek aan meer extreme data wordt hier aanvankelijk geen hoog risico toegekend.

Zie appendix A voor de exacte uitgevoerde analyse.

Natuurlijke gevaren in Colombia



Figuur 1: Natuurlijke gevaren in Colombia die in dit onderzoek gebruikt zijn, opgesplitst in niveau's van laag, middelhoog en hoog gevaar. Eigen bewerking van meerdere databronnen.

2.2. Samengesteld gevaar

Samengestelde gevaren zijn natuurlijke gevaren die na elkaar gebeuren, waarbij de eerste gebeurtenis een andere gebeurtenis kan veroorzaken van een ander type gevaar (Alexander, 1993). Een voorbeeld hiervan is dat, als er een overstroming gebeurt, de rivieroever kan instorten door het water. Om te voorkomen dat de totale blootstelling voor een gebeurtenis wordt onderschat, is het belangrijk om ook de gevaren mee te nemen die ontstaan doordat het primaire gevaar is ontstaan. Gill & Malamud (2014) hebben een framework ontwikkeld waarin beschreven wordt welke secundaire gevaren kunnen worden getriggerd door een primaire ramp, en hoeveel impact het secundaire gevaar hierop heeft. Uit het framework van Gill & Malamud kunnen we de relaties tussen gevaren beschouwen zoals beschreven in tabel 2.

Tabel 2: gevonden relaties tussen primaire en secundaire hazards

Primaire gevaar	Secundaire geva(a)r(en)
Aardverschuiving	Geen
Aardbeving	Aardverschuiving
Overstroming	Aardverschuiving
Tropische cycloon	Aardverschuiving, overstroming

Dit zal in dit onderzoek gesimuleerd worden door het risiconiveau van een primair gevaar plaatselijk te verhogen als de extent van een van de secundaire gevaren overeenkomt met de extent van het primaire gevaar. Bijvoorbeeld: als een overstroming een laag gevaar heeft, maar het gebied is zeer gevoelig voor aardverschuivingen, dan kan het gevaarsniveau verhoogd worden naar hoog gevaar. Dit gebeurt volgens de volgende formule:

$$C = H_1 + R_2 * T_2 * H_2$$

Waarbij C de waarde voor de compound hazard is, H_1 de waarde van het primaire gevaar (het gevaar dat als eerste gebeurt), H_2 de waarde van het secundaire gevaar, R_2 de ruimtelijke overlap van het tweede gevaar op het eerste gevaar, en T_2 de temporele kans van het tweede gevaar bij voorkomen van het eerste gevaar. Deze formule is zelf ontworpen, aan de hand van inzichten die door Gill & Malamud zijn gegeven.

De waardes van H_1 en H_2 worden bepaald aan de hand van de eerder bepaalde classificaties. Voor een laag gevaar wordt 0,25 genomen, bij middelhoog gevaar wordt 0,5 genomen, en bij een hoog gevaar wordt 0,75 genomen. Door deze formule is het echter mogelijk dat een middelhoog gevaar of hoog gevaar wordt opgeschaald naar een getal boven de 1. Deze gebieden zullen aangemerkt worden als *zeer hoog gevaar*. Een zeer hoog gevaar is dus alleen mogelijk als er naast een middelhoog/hoog gevaar van het primaire gevaar ook een middelhoog/hoog niveau aanwezig is van het secundaire gevaar. Als er bijvoorbeeld een aardbevingsgevaar is op een plek waar ook een hoge kans op aardverschuivingen aanwezig is, wordt de waarde voor het aardbevingsgevaar verhoogd.

Voor R_2 wordt 0,85 genomen als de ruimtelijke overlap (spatial extent) als hoog is aangemerkt volgens Gill en Malamud (2014), 0,5 bij middelhoog, en 0,15 bij laag. Voor T_2 worden geen duidelijke cijfers gegeven, maar van wat er beschreven wordt, kan bij een hoge temporele kans een T van 1 genomen worden (secundaire gevaar volgt altijd) en bij een middelhoge temporele kans kan een 0,5 genomen worden (secundaire gevaar volgt soms). In hun onderzoek staat dat een lage temporele kans slechts een theoretische kans is, dus die relaties zullen niet meegenomen worden. In figuur 2 is te zien hoe deze formule tot een verandering heeft geleid bij aardbevingen en tropische cyclonen. Hoewel er bij overstromingen ook veranderingen optreden, zijn deze veranderingen zo klein dat ze irrelevant zijn voor het figuur.

Natuurlijke gevaren in Colombia, met samengesteld gevaar



Figuur 2: Gevaar van tropische cyclonen en aardbevingen in Colombia, met secundaire gevaren meegerekend. Opgesplitst in laag, middelhoog, hoog, en zeer hoog gevaar. Eigen bewerking van meerdere databronnen.

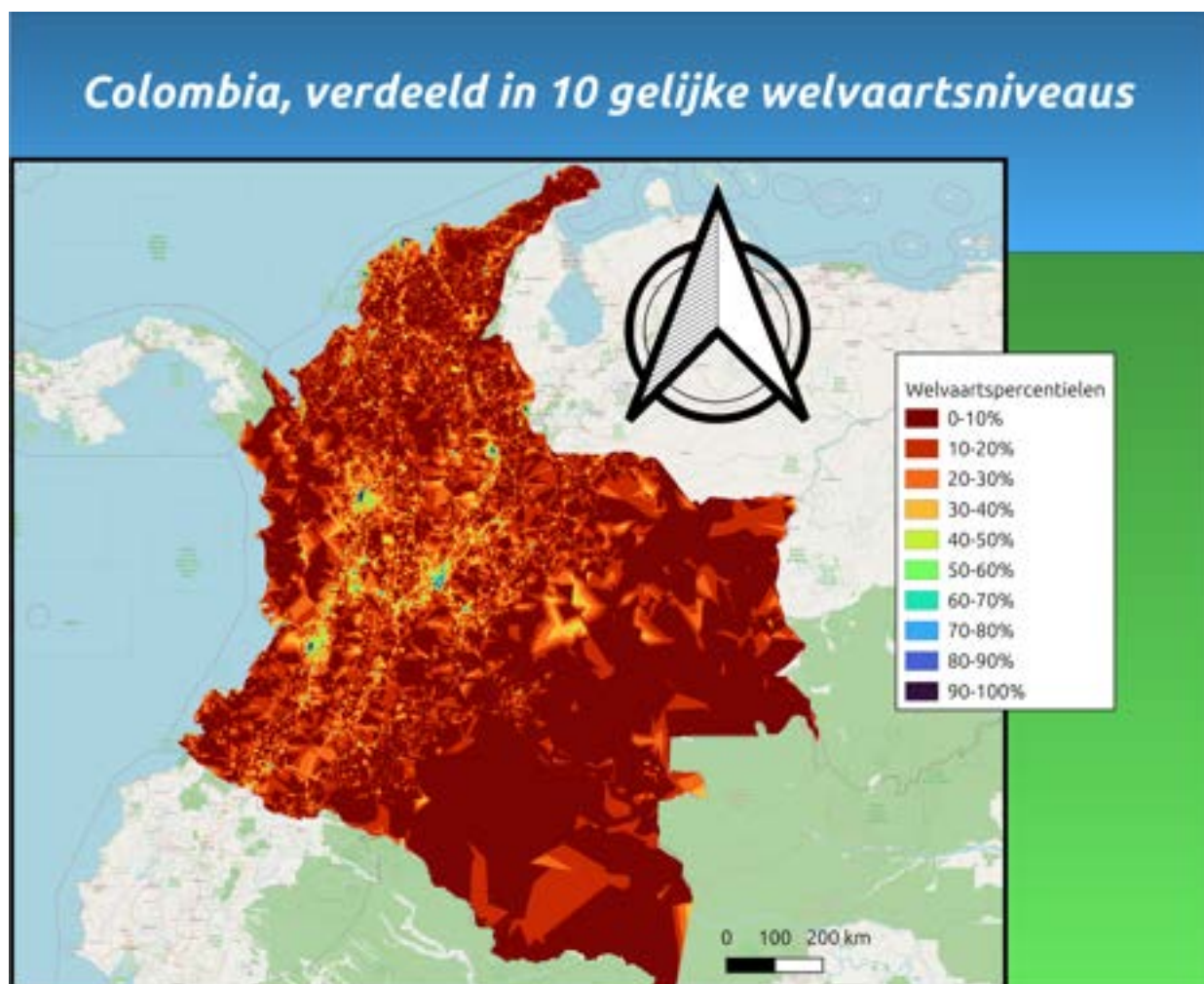
2.3. Bevolking en welvaart

Nadat de data over gevaren is verzameld, is het zaak om informatie over de bevolking en welvaart te krijgen. Voor de bevolking hanteer ik de data zoals opgesteld door de UN, downloadbaar vanaf de website van Worldpop (Worldpop, 2020). Deze kaart heeft een resolutie van 30 arcseconden, en een schatting van 60,1 miljoen inwoners in Colombia. Voor het kwantificeren van de welvaart wordt de data van Chi et al. (2021) gebruikt. Deze bron geeft ruimtelijke welvaart weer als een getal tussen de -2 en 2. Het is onduidelijk wat dit getal representeert.

De bevolkingskaart van Colombia wordt verdeeld in tien groepen, waarbij elke groep evenveel inwoners heeft en elke groep een welvaartsklasse representeert. Er is gekozen om de gehele bevolking mee te nemen in de analyse, en niet alleen te focussen op plekken met veel inwoners. Dat is gedaan omdat het belangrijk is om de inheemse bevolking mee te nemen, waarvan er naar schatting 1,5 tot 5 miljoen individuen zijn (Gobierno de Colombia, 2019). In tabel 3 is beschreven hoe die welvaartsklassen eruit zien, aan de hand van een subjectieveling visuele analyse via satellietbeelden en foto's. In figuur 3 is een kaart te zien waar de spreiding van de welvaartsgroepen te zien zijn. In figuur 3 is goed te zien dat gebieden met lage welvaart vaak dunbevolkter zijn dan gebieden met hoge welvaart.

Tabel 3: beschrijving van welvaartsklassen aan de hand van een subjectieve, visuele analyse

Welvaartsklasse	Beschrijving van leefomstandigheden
0-10%	Kleinschalige boeren, veehouderijen, amper goede wegen
10-20%	Koffieboeren, veehouderijen, gravelwegen
20-30%	Achterstandsdorpen, rurale gemeenschappen, beperkt autobezit, asfaltwegen
30-40%	Rurale gemeenschappen, groeikernen bij grote steden
40-50%	Buitenrand van sloppenwijken, groeikernen bij grote steden
50-60%	Sloppenwijken, armere stadswijken
60-70%	Buitenwijken van grote steden, stadskernen van kleinere steden
70-80%	Relatief welvarende buurten, goede infrastructuur, redelijk veel autobezit
80-90%	Stadskernen van middelgrote steden, relatief welvarende buurten, veel autobezit
90-100%	Gated communities, flatgebouwen, zeer welvarende buurten



Figuur 3: Kaart van Colombia, verdeeld in 10 niveau's van welvaart, met gelijke bevolking in elk niveau. Bewerking van data van Chi et al. (2021).

2.4. Significantie

Na het bepalen van het aantal mensen per risicogroep, zal er gekeken worden of er een significante trend te vinden is in de data tussen blootstelling aan gevaren en welvaartsniveau. Dit wordt gedaan aan de hand van de `stats.lingress`-functie van de Scipy-package in Python (versie 1.17.0). Deze functie maakt een lineaire regressie aan de hand van één afhankelijke (aantal blootgestelde mensen) en één onafhankelijke (welvaartsgroepen) variabele. Deze lineaire regressie zal uitgevoerd worden per gevaarsniveau, waarbij de coëfficiënt de stijging of daling weergeeft van de blootstelling bij toenemende rijkdom. De gebruikte code voor het maken van de grafieken en regressies is te vinden in appendix C.

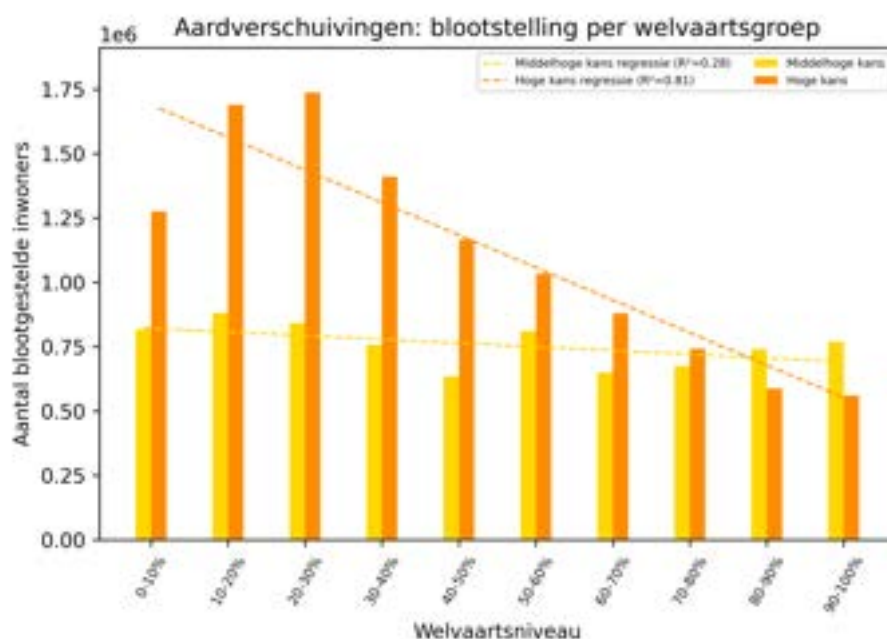
3. Resultaten

Om de resultaten te krijgen, heb ik na de GIS-analyse de data gecompileerd en gevisualiseerd met behulp van python. Dit geeft antwoord op de deelvragen “Welke rampen laten het meeste verschil zien in exposure naar welvaartsniveaus?” en “Is dit verschil statistisch significant?”. De komende koppen zullen het aantal blootstelling laten zien per welvaartsgroep per risiconiveau zoals de gebruikte data laat zien volgens de situatie in Colombia. Dit wordt vergezeld met tabellen die de trend voor elk gevaarsniveau weergeven zoals de lineaire regressie ze heeft gevonden. Een positieve coëfficiënt betekent dat de blootstelling hoger is in rijkere gebieden, en een negatieve coëfficiënt betekent dat de blootstelling hoger is in armere gebieden. Tabellen met de exacte aantallen blootgestelde inwoners kunnen gevonden worden in Appendix B.

3.1. Aardverschuivingen

In figuur 4 is de relatie te zien tussen het risico op aardverschuivingen en welvaart. De y-as is in miljoenen inwoners. Er is in de grafiek een duidelijke trend te zien in de hoge kans, maar bij de middelhoge kans is de trend veel zwakker. In tabel 4 zijn de resultaten uit de regressie gekomen, waar te zien is dat het echte verschil zit bij de hoge kans. De negatieve trend betekent dat mensen in hogere welvaartsgroepen minder zijn blootgesteld aan aardverschuivingen.

De risicogebieden voor aardverschuivingen zijn voornamelijk in de drie takken van de Andes te vinden. Daarmee zijn het vooral gemeenschappen die in bergachtige gebieden wonen die hier risico op lopen.



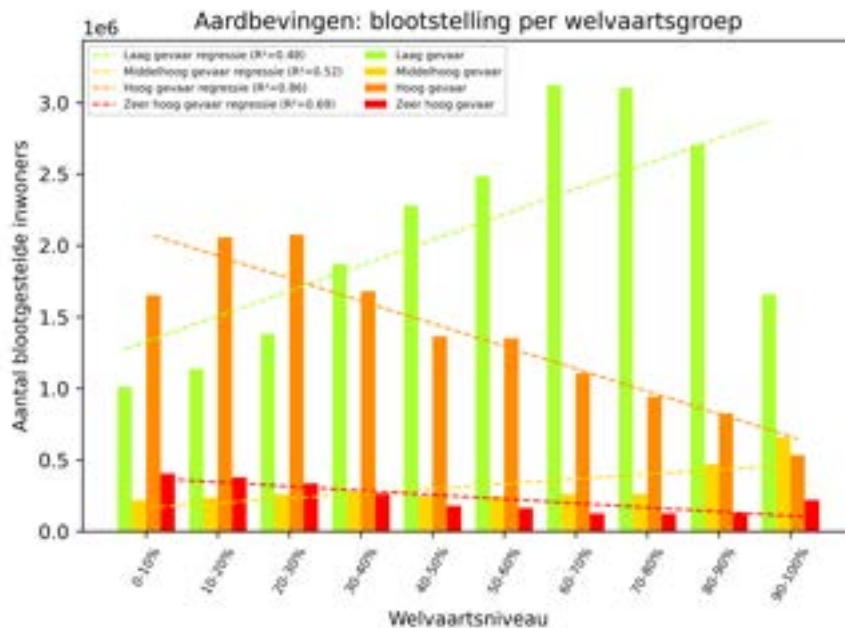
Figuur 4: blootstelling aan aardverschuivingen per welvaartsniveau, opgesplitst per gevaarsniveau, met een regressielijn die de relatie tussen blootstelling en welvaart voor elk gevaarsniveau weergeeft. Op de x-as staan welvaartsniveaus, op de y-as staat het aantal blootgestelde inwoners in miljoenen.

Tabel 4: Regressietabel voor de relatie tussen welvaart en blootstelling aan aardverschuivingen voor verschillende risicoklassen. Constante en coëfficiënten zijn in aantal blootgestelde mensen.

	(1)	(2)
Constante	823.282 (44.172)	1.676.950 (114.270)
Middelhoge kans	-14.497 (8274)	
Hoge kans		-126.396*** (21.405)
R ²	0,28	0,81
N	10	10
* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01 voor coëfficiënten		

3.2. Aardbevingen

In figuur 5 is te zien hoe de blootstelling aan aardbevingen is verdeeld over verschillende welvaartsgroepen. De y-as is in miljoenen inwoners. Behalve voor het hoge gevaarsniveau is er geen duidelijke trend te ontdekken in deze resultaten. In tabel 5 is te zien dat er een statistisch significante dalende trend is voor de twee hoogste gevaarsklassen, maar dat het bij de twee laagste gevaarsklassen eerder omhoog lijkt te gaan. Bij de lage gevaarsklasse is echter te observeren dat de blootstelling weer sterk afneemt in de twee hoogste welvaartsniveaus.



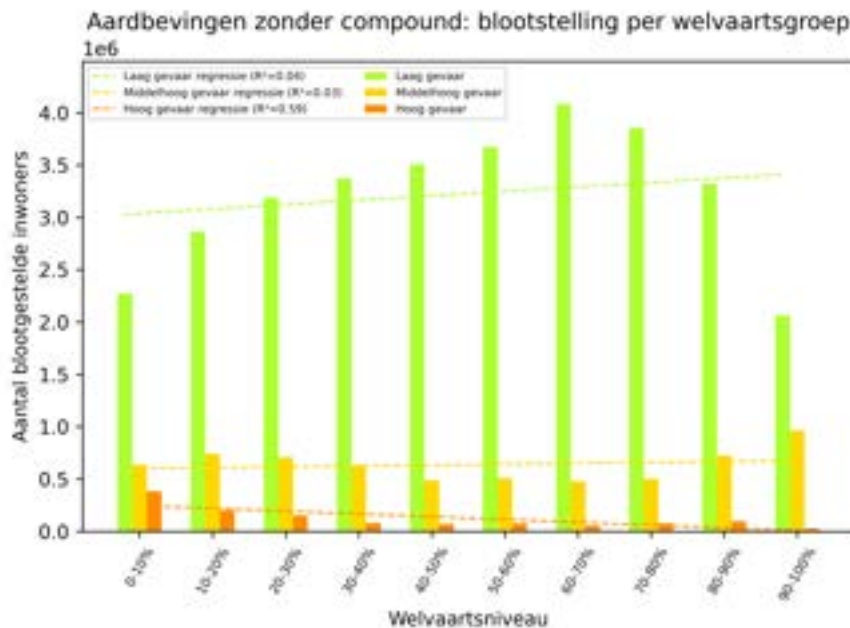
Figuur 5: blootstelling aan aardbevingen per welvaartsniveau, opgesplitst per gevaarsniveau, met een regressielijn die de relatie tussen blootstelling en welvaart voor elk gevaarsniveau weergeeft. Op de x-as staan welvaartsniveaus, op de y-as staat het aantal blootgestelde inwoners in miljoenen.

Tabel 5: Regressietabel voor de relatie tussen welvaart en blootstelling aan aardbevingen voor verschillende risicoklassen. Constante en coëfficiënten zijn in aantal blootgestelde mensen.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	1.373.734 (351.222)	162.085 (60073)	2.071.013 (119.341)	364.931 (36.979)
Laag gevaar	178155** (65790)			
Middelhoog gevaar		33441** (11253)		
Hoog gevaar			-158.158*** (22.355)	
Zeer hoog gevaar				-29.523*** (6927)
R ²	0,48	0,52	0,86	0,69
N	10	10	10	10
* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01				

In figuur 6 zijn de resultaten te zien van de analyse zonder samengesteld gevaar, waarbij er alleen maar het gevaar van aardbevingen zelf is te zien. Ten eerste is er te zien dat er geen lineaire trend te zien is in de lage gevaarsklasse en de middelhoge gevaarsklasse, al is er wel een parabool-achtige trend te zien in de data voor laag gevaar, wat betekent dat voornamelijk mensen van middelbaar inkomen in gevaarsgebieden wonen.

In tabel 6 is te zien dat, van de drie niveaus, alleen het hoge gevaarsniveau een statistische significantie heeft. Dit duidt erop dat er nog steeds gevaarwerend gedrag plaatsvindt bij hoge inkomens bij aardbevingsgevaar.



Figuur 6: blootstelling aan aardbevingen zonder samengesteld gevaar per welvaartsniveau, opgesplitst per gevaarsniveau, met een regressielijn die de relatie tussen blootstelling en welvaart voor elk gevaarsniveau weergeeft. Op de x-as staan welvaartsniveaus, op de y-as staat het aantal blootgestelde inwoners in miljoenen.

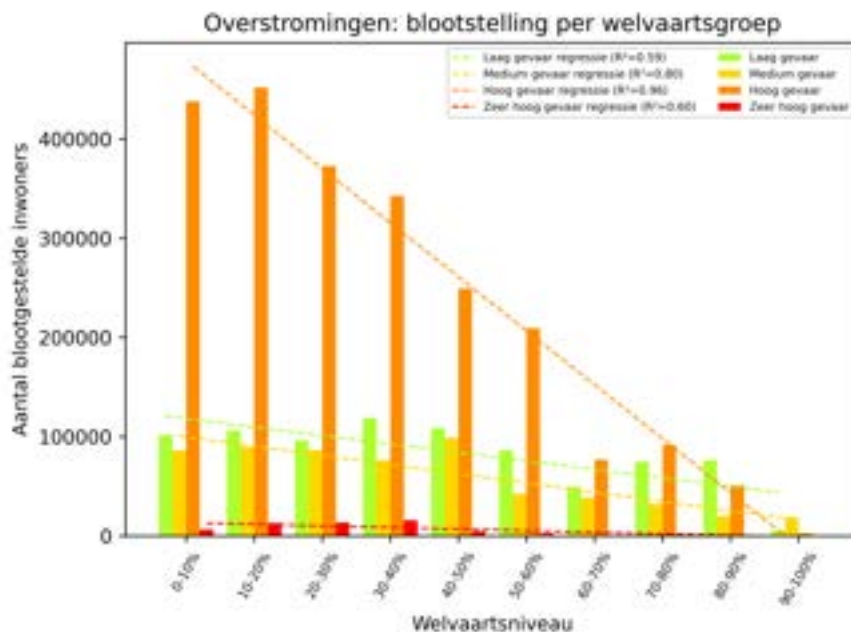
Tabel 6: Regressietabel voor de relatie tussen welvaart en blootstelling aan aardbevingen voor verschillende risicoklassen. Constante en coëfficiënten zijn in aantal blootgestelde mensen.

	(1)	(2)	(3)
Constante	3.030.300 (399.177)	599.674 (94.489)	241.140 (41.693)
Laag gevaar	42.069 (74.773)		
Middelhoog gevaar		8470 (17.699)	
Hoog gevaar			-26.487*** (7810)
R ²	0,04	0,03	0,59
N	10	10	10

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

3.3. Overstromingen

In figuur 7 is te zien hoe het risico op overstromingen zich verhoudt tot welvaart. In de figuur zijn voornamelijk dalende lijnen te zien, wat aangeeft dat dit gevaar zich sterk verhoudt tot inkomen. De resultaten van de regressies in tabel 7 ondersteunen dit. Hier is te zien dat overall significante relaties zijn, waarbij de daling van het hoge gevaarsniveau zowel de sterkste daling als de meest significante relatie toont.



Figuur 7: blootstelling aan overstromingen per welvaartsniveau, opgesplitst per gevaarsniveau, met een regressielijn die de relatie tussen blootstelling en welvaart voor elk gevaarsniveau weergeeft. Op de x-as staan welvaartsniveaus, op de y-as staat het aantal blootgestelde inwoners in miljoenen.

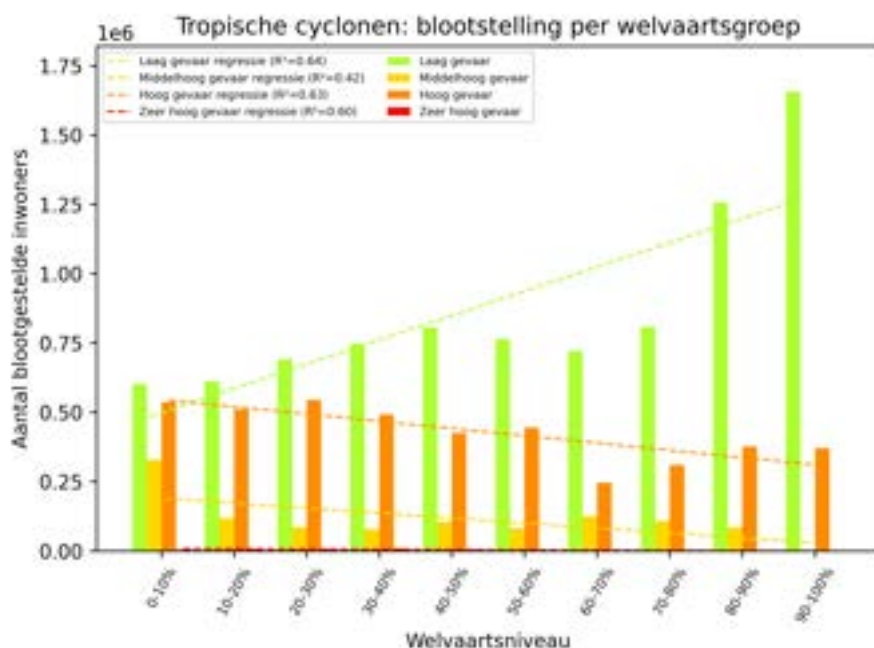
Tabel 7: Regressietabel voor de relatie tussen welvaart en blootstelling aan overstromingen voor verschillende risicoklassen. Constante en coëfficiënten zijn in aantal blootgestelde mensen.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	120.804 (13.508)	100.578 (8671)	473.296 (19.737)	12.761 (2482)
Laag gevaar	-8547*** (2530)			
Middelhoog gevaar		-9298*** (1624)		
Hoog gevaar			-54.384*** (3697)	
Zeer hoog gevaar				-1603*** (465)
R ²	0,59	0,8	0,96	0,6
N	10	10	10	10

* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01

3.4. Tropische cyclonen

In figuur 8 is de blootstelling aan tropische cyclonen te zien per welvaartsgroep. De y-as is in miljoenen inwoners. De grafiek laat zien dat er weinig verschil is tussen de algemene blootstelling van de lagere en hogere welvaartsgroepen. Voor het lage gevaarsniveau is deze relatie positief, terwijl het bij het hoge gevaarsniveau een negatieve relatie laat zien. In tabel 8 zie je dat het laagste gevaarniveau een positieve relatie heeft. De andere drie niveaus laten een significante daling zien. Ook het hoogste gevaarsniveau laat een significante daling zien, maar de vraag is hoe significant dit is, gezien de constante slechts 7,4 duizend is.

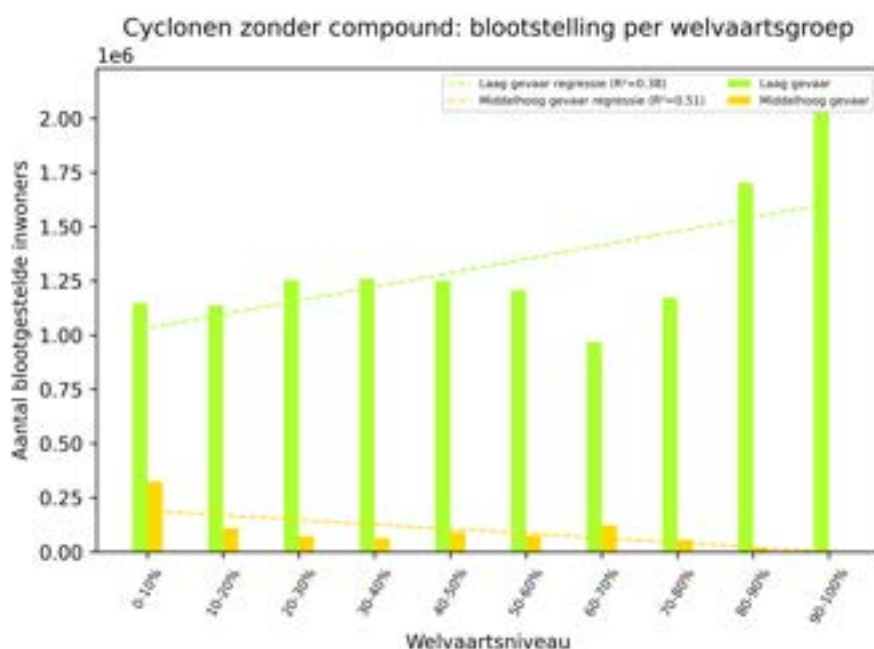


Figuur 8: blootstelling aan aardverschuivingen per welvaartsniveau, opgesplitst per gevaarsniveau, met een regressielijn die de relatie tussen blootstelling en welvaart voor elk gevaarsniveau weergeeft. Op de x-as staan welvaartsniveaus, op de y-as staat het aantal blootgestelde inwoners in miljoenen.

Tabel 8: Regressietabel voor de relatie tussen welvaart en blootstelling aan tropische cyclonen voor verschillende risicoklassen. Constante en coëfficiënten zijn in aantal blootgestelde mensen.

	(1)	(2)	(3)	(4)
Constante	472.314 (124.738)	192.012 (39.867)	543.746 (37.650)	7424 (1442)
Laag gevaar	87.594*** (23.366)			
Middelhoog gevaar		-17.895** (7468)		
Hoog gevaar			-26.184*** (7052)	
Zeer hoog gevaar				-936*** (6397)
R ²	0,64	0,42	0,63	0,6
N	10	10	10	10
* p<0,1; ** p<0,05; *** p<0,01				

In figuur 9 is de relatie weergegeven tussen welvaart en blootstelling aan tropische cyclonen zonder samengesteld gevaar. In dit figuur is bij het lage gevaarsniveau geen duidelijke trend aanwezig, behalve de uitschieter op de hoge welvaartsniveaus. Bij het middelhoge gevaarsniveau is wel een significante trend omlaag aanwezig, volgens tabel 9.



Figuur 9: blootstelling aan aardverschuivingen per welvaartsniveau, opgesplitst per gevaarsniveau, met een regressielijn die de relatie tussen blootstelling en welvaart voor elk gevaarsniveau weergeeft. Op de x-as staan welvaartsniveaus, op de y-as staat het aantal blootgestelde inwoners in miljoenen.

Tabel 9: Regressietabel voor de relatie tussen welvaart en blootstelling aan aardbevingen voor verschillende risicoklassen. Constante en coëfficiënten zijn in aantal blootgestelde mensen.

	(1)	(2)
Constante	1.024.930 (153.026)	188.072 (38.955)
Middelhoog kans	63.934* (8274)	
Hoge kans		-20.974** (7297)
R ²	0,38	0,51
N	10	10

*p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01

4. Discussie

Deze sectie zal de resultaten bespreken en verbanden proberen te leggen tussen deze studie en soortgelijke literatuur. Ook zal deze sectie ingaan op de gevolgen van deze bevinding, en eventuele oplossingen voor dit probleem. Het beantwoordt de deelvraag “Hoe wordt een eventueel verschil in blootstelling teruggekoppeld op de lokale sociale context?”.

4.1. Conclusies uit de resultaten

Voor aardverschuivingen is er voor het hoge gevaargebied een duidelijke dalende lijn te zien, maar voor middelhoge kans is er amper een verband, waarbij de regressielijn bijna vlak gaat. Dit betekent dat er uitwijkingsgedrag is als er een hoog risico is op verschuivingen, maar niet bij een kleiner risico. Een mogelijke verklaring hiervoor kan zijn dat, omdat de middelhoge kans wordt omschreven als ‘een gebeurtenis met een herhalingsstijd tussen de 100 en 1000 jaar’, het door de lange herhalingsstijd niet bekend is dat die gebieden een risico vormen. Desondanks kan er wel concluderen worden dat er een sterk verband is tussen kans op aardverschuivingen en welvaart.

Voor aardbevingen zijn meerdere trends zichtbaar in de data. Voor de eerste twee gevaarniveaus is er een positieve trend te zien, wat betekent dat het gevaar op dat niveau meer voorkomt in de rijkere gebieden. Er is echter voor hoog en zeer hoog gevaar een sterke dalende trend te zien. Deze trend is niet zo duidelijk te zien in figuur 6, wat betekent dat die trend zeer waarschijnlijk komt door het toegevoegde gevaar van aardverschuivingen. Ook is in figuur 1 te zien dat er van nature maar weinig hoog aardbevingsrisico aanwezig is. Het laat vooral zien dat er maar weinig mensen wonen in het hoge gevaarsgebied, wat betekent dat het aannemelijker is dat iedereen aardbevingen evenveel vermijdt, waarmee dit gevaar niet direct een relevant gevaar is in de relatie tussen blootstelling en welvaart.

De resultaten voor overstromingen laten een zeer duidelijke trend zien naar beneden. In alle 4 niveaus is er een zeer significante trend omlaag waar te nemen, zoals te zien in figuur 7, wat betekent dat gebieden die snel overstroomd vaak een lagere welvaart hebben. Er zijn amper steden in de risicogebieden voor overstromingen. Er zijn veel rivieren die langs een grote stad gaan, maar de overstroming gaat eigenlijk nooit de stad zelf in. Dit insinueert dat veel steden al degelijke maatregelen tegen overstromingen hebben getroffen. Dit is anders voor de dorpen aan de oostkant van het land, die vaak midden in het risicogebied liggen.

Bij tropische cyclonen is er geen duidelijke trend te zien. Het lijkt er hier op dat rijke steden niet meer landinwaarts zijn gaan bouwen om stormen te vermijden. Omdat cyclonen van nature niet hoger gaan dan middelhoog gevaar, kan een hoog of zeer hoog gevaar alleen maar aanwezig zijn als er op dezelfde plek kans is op overstromingen of aardverschuivingen. Bij het hoge welvaartsniveau is echter wel een stijging te zien in de hogere welvaartsklassen, wat hoogstwaarschijnlijk komt doordat Medellín deels in het lage gevaarsniveau ligt. Dat legt ook gelijk bloot dat de positionering van steden belangrijk is voor gevaren met grote extent, zoals tropische cyclonen. Echter zijn er voor hogere risico's weer een dalende lijn, wat betekent dat er voor de hogere gevaarsniveau's weer de traditionele arm-rijkverhouding te zien is. Hiermee is er te zien dat er tijdens een tropische cycloon een verschil kan optreden tussen welvaartsniveaus, alhoewel dit verschil zich voornamelijk lijkt te vertalen in aardverschuivingen en overstromingen. Dit beeld wordt versterkt door figuur 9, waar dezelfde analyse is te zien zonder samengesteld gevaar. Hier is alleen in het middelhoge gevaarsniveau een daling te zien in de trend, maar dit zou net zo goed kunnen komen door een toevallige afwezigheid van grote steden in het middelhoge gevaarsgebied, dat van zichzelf vrij klein is.

4.2. Sociaal-economische vergelijkingen met literatuur

Het onderzoek van Mertens & Vranken (2018) is tot de conclusie gekomen dat het land van rijkere boeren gemiddeld minder gevoelig is voor aardverschuivingen, gebleken uit een studie van West-Oeganda. Volgens de onderzoekers is dit omdat rijkere boeren in een gebied met aardverschuivingen sneller stukken land kopen waar er geen dergelijk gevaar is. Dit zouden ze doen omdat ze daardoor minder kans hebben om onder de armoedegrens te vallen in een enkele ramp. Armere boeren die minder land hebben, hebben niet het kapitaal of de goederen om naar een gunstiger gebied te verhuizen, waardoor ze vast blijven zitten op een plek met meer risico op aardverschuivingen. Hoewel de resultaten van mijn studie een trend naar beneden laten zien over meerdere welvaartsniveau's, laten ze in de lagere welvaartsgroepen juist een lichte stijging zien. Als de situatie in Colombia en Oeganda vergelijkbaar is, kan dit betekenen dat de gebruikte data voor dit onderzoek inadequaat is in het laten zien van verschillen in rurale gebieden.

Onderzoek van Garcia-Delgado et al. (2022) onderstreept de resultaten van Mertens & Vranken, die een correlatie hebben gevonden tussen een hoge lokale gini-indexgetal en het aantal doden aan aardverschuivingen in Colombia. Volgens hen is dit effect toe te wijten aan twee dingen. Ten eerste worden veel aardverschuivingen veroorzaakt door illegale mijnbouw, waar voornamelijk arme jonge mannen aan het risico worden blootgesteld. Ten tweede worden er veel bouwprojecten gerealiseerd op oude aardverschuivingen zonder mitigerende maatregelen, wat toe te wijten valt aan corruptie en clientpolitiek. Daarmee zou blijken dat de resultaten van mijn onderzoek in grote lijnen wel overeenkomen met bevindingen uit andere literatuur.

4.3. Overzicht van oplossingen voor het probleem

Hoewel het een simpele oplossing lijkt om dorpen in de rivieroeveren te verplaatsen en de moerasnatuur te herstellen, worden de kosten hiervan vaak over het hoofd gezien (Desai et al., 2021). Daarom wordt er bij lokale overheden vaak nadruk gelegd op vrijwillige verplaatsing, een proces waar vaak minimale overheidshulp bij te pas komt en wat op veel weerstand duidt door culturele verbondenheid en een laag waargenomen risico (Bower et al., 2023; Dang et al., 2010; Moreira et al., 2025). Zeker in een land waar rurale gebieden structureel te maken hebben met een zwakke overheid, wordt het lastig om een goede strategie te ontwikkelen om de schade aan huizen, landbouw en infrastructuur zo klein mogelijk te maken in de toekomst. De meeste verandering komt daarom ook door lokale gemeenschappen (Bower et al., 2023), die samenwerken om een naderend risico te vermijden. De grootste valkuil van proactieve overheden is het niet actief betrekken van de lokale gemeenschappen bij hazard mitigation, wat voornamelijk bij overstromingen speelt.

In Colombia wordt er de afgelopen decennia steeds meer aandacht gegeven aan het verdedigen tegen gevaren (Rubiano et al., 2025). Dit uit zich onder andere in het vrijmaken van geld voor noodhulp en projecten die op de lange termijn zorgen voor een lagere kwetsbaarheid. Dit is bijvoorbeeld te zien langs de Cauca-rivier, die langs Cali en Medellín stroomt. Dit is een plek waar het gevaar voor overstroming extra hoog is, omdat er door veranderingen in landgebruik amper natuurlijke barrières zijn tegen water (Jimenez, 2025).

De afgelopen paar jaar wordt er in grote steden steeds meer gedaan om klimaatverandering tegen te gaan. Hier worden onder andere steeds meer bomen en vegetatie geplant, om stedelijke overstromingen te voorkomen (UNEP, 2024). Er wordt echter ook vastgesteld dat het in achterstandswijken en rurale gemeenschappen voornamelijk om inspanningen van de gemeenschap zelf gaat om de problemen op te lossen (Jimenez, 2025; The Guardian, 2026).

4.4. Methodologische overwegingen

Alle gebruikte data is op mondiaal niveau. Hierdoor is de kwaliteit van de data minder goed dan als er data beschikbaar zou zijn op landsniveau. Inspanningen om relevante data op landsniveau te maken en openbaar beschikbaar te maken, zouden de kwaliteit van dit onderzoek kunnen verbeteren. Dit geldt vooral voor overstromingsdata. Zo is het nadeel van de huidige data dat het alleen flood extents van grotere rivieren meeneemt en zijrivieren grotendeels achterwege laat, waardoor de data het totale probleem sterk kan onderschatten (Dottori et al., 2016).

Er bestaan vraagtekens bij de nauwkeurigheid van de welvaartsdata van Chi et al. Zo is een groot deel van Cuidad Bolívar, de grootste sloppenwijk van Bogotá, aangeduid als welvaartsklasse 80-

90%. La Castilla, een gated community in de stad Armenia, is aangeduid als welvaartsklasse 40-50%. Hoewel dit zeker niet de norm is, zijn dit soort outliers wel relevant. Een mogelijke verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat het model een hoge bevolkingsdichtheid in verband heeft gebracht met een hoge welvaart, wat averechts werkt in sloppenwijken. Hierdoor ontstaan vragen over hoe representatief de data is voor de bevolking.

Een andere verklaring voor dit fenomeen is dat, door regionale ingrepen in de steden Bogotá en Medellín, de sloppenwijken er anders uitzien dan normaal (Magalhães et al., 2016; South America Backpacker, 2015). Onder andere het gondelnetwerk dat de afgelopen decennia is aangelegd in veel sloppenwijken, en de opmerkelijke kleuren van de huizen, worden hiervoor als oorzaken genoemd.

Bij het gebruik van welvaartsdata op deze schaal, is het nadeel dat de welvaartsgebieden steeds dichtbevolkter worden naarmate de welvaart hoger wordt. Uiteindelijk zijn de hoogste klassen alleen maar aanwezig in de centra van grote steden. Dit heeft tot gevolg dat een uitkomst in de blootstelling bij een hoge welvaart ook veel te maken heeft met waar de grote steden gesitueerd zijn. Afhankelijk van waar deze steden zitten, kan een gevaar een grote blootstelling krijgen in de hogere welvaart, of juist helemaal geen. Dit is een nadeel van deze benadering, aangezien het niet helemaal eenduidig is of een aanwezige trend komt doordat er systematisch meer blootstelling is voor armere mensen, of doordat er toevallig geen steden in het gebied met hoog gevaar ligt.

Om deze studie simpel te houden, zijn alle gevaren benaderd vanuit één aspect. Bij overstromingen is dit bijvoorbeeld de inundatiediepte, en bij aardbevingen de PGA (peak ground acceleration). Echter wordt het werkelijke risico hierbij vaak onderschat (Ward et al., 2016). Zo is de duur van de gebeurtenis ook van groot belang bij het bepalen van hoe groot het gevaar en de blootstelling is. De duur van een overstroming is bijvoorbeeld een belangrijke factor in het bepalen van het gevaarsniveau (Dang et al., 2010). De keuzes voor de gebruikte data zijn gemaakt op basis van veelal geaccepteerde indicatoren voor schade, wat samenhangt met hoeveel data er beschikbaar is. Daarom is besloten tot de huidige gebruikte data. Hiermee dient dit onderzoek te worden gezien als een benadering van de totale blootstelling.

Idealiter zou vulkanisme ook meegenomen worden, omdat vulkanen behoren tot een van de grootste gevaren van het land (Stern, 2004). Omdat vulkanen een zeer complex gevaar zijn, zal het een hele studie op zich kunnen vormen om een hazardkaart daarvoor te maken. Een soortgelijke hazardkaart is beschikbaar (Villegas, 2003), maar is niet meer te downloaden als een GIS-kaart. Door het gebrek aan deze data is daarom de beslissing genomen om vulkanisme niet mee te nemen in deze studie.

Er is besloten om droogte niet mee te nemen in de analyse, omdat uit data blijkt dat droogte een veel kleiner probleem is dan de andere natuurlijke gevaren (World Bank Group, 2024b; Zomer & Trabucco, 2025). Zomer & Trabucco (2025) laten in hun figuur zien dat Colombia een zeer humide land is. Ook wordt het gevaar bij droogte grotendeels bepaald door de toegang tot verbeterde drinkwaterbronnen (UNEP, 2004), en dit is in Colombia op een vrij hoge 85% van de bevolking (Polanía, 2022). Echter is er ondanks het hoge percentage een vrij ongelijke verdeling over het land, waarbij vaak de armste rurale gemeenschappen geen toegang hebben tot schoon water. Er is echter zonder data over dergelijke weersextremen weinig te zeggen over het verband tussen welvaart en blootstelling aan droogte.

Bij deze studie is gebruik gemaakt van een samengesteld gevaar, waarbij een formule is gebruikt om dit te berekenen. Hoewel dit is bedoeld om slechts een benadering te geven van het totale

gevaar, kan deze methode vraagtekens oproepen. Zo telt het arbitraire wegen bij elkaar op, waarbij de uitkomsten ook vrij los zijn. Ook neemt deze versimpeling niet mee dat samengestelde rampen minder effect hebben als de eerste ramp al voor totale ravage heeft gezorgd. Ook neemt het niet mee dat bepaalde aardverschuivingsgebieden meer reageren op aardbevingen, en andere gebieden meer reageren op overstromingen en regenval. Ondanks de beperkingen van deze methode is toch besloten om het in de analyse te laten. Dit is gedaan om te laten zien dat bepaalde rampen, die van zichzelf geen duidelijke relatie hebben met welvaart, indirect toch de armere gebieden harder kunnen treffen.

5. Conclusie

In deze studie werd onderzocht of mensen met lage welvaart een hogere blootstelling hebben aan verschillende natuurrampen. In een Qgis-analyse hebben vier soorten gevaren, aardverschuivingen, aardbevingen, overstromingen, en tropische cyclonen, een classificatie gekregen waarbij natuurlijke gevaren werden ingedeeld in groepen van laag, middelhoog, en hoog gevaar. Daarbij zijn ook secundaire gevaren in acht genomen, waarmee er een kans was dat een gebied de classificatie ‘zeer hoog gevaar’ kreeg. Met dit classificatiesysteem is als resultaat gekomen dat er voornamelijk bij aardverschuivingen en overstromingen meer blootstelling voorkomt bij lage welvaartsgroepen dan bij hoge welvaartsgroepen.

Op methodologisch vlak heeft deze studie voor het eerst gebruikgemaakt van data over ruimtelijke welvaartsverdeling op fijne ruimtelijke schaal (2,4 km² per pixel). Met deze data is het mogelijk om op kleine schaal patronen in welvaart te onderscheiden, waar dit eerst meestal alleen op districtniveau kon. Hiermee kun je per stadsdeel kijken naar de rijkdom, en dit in verband trekken met blootstelling aan natuurlijke gevaren. Er bestaan echter een paar vraagtekens bij de accurateheid van deze data. Daarom wil ik adviseren om deze data te blijven verbeteren en eventueel andere parameters voor andere werelddelen of landen te gebruiken.

Deze studie streeft naar het in kaart brengen van SDGs 10 en 11 in lokale context, die respectievelijk mikken op het verminderen van ongelijkheid en het verminderen van risico op natuurlijke gevaren. In de socio-economische analyse heb ik laten zien dat dit een grote uitdaging is buiten de grote steden, wat voornamelijk komt door slechte bestaande infrastructuur, een zwakke overheid, en weerstand van de lokale bevolking tegen het verplaatsen van hun cultureel erfgoed. Daarom moet er structureel aandacht worden gegeven aan het mitigeren van risico. Waarschijnlijk moet dit kleinschalig gebeuren, in overleg met de lokale gemeenschappen.

5.1. Aanbevelingen

De ruimtelijke welvaartsdata vormt een obstakel voor dit onderzoek. Aanbevolen is om onderzoek te doen naar de regiospecifieke welvaartsdata, bijvoorbeeld via detectie van sloppenwijken met behulp van machine learning-modellen. Dit zal nauwkeurigere data opleveren voor dit onderzoeksgebied. Ook zou hiermee een kwetsbaarheidsanalyse mee gedaan kunnen worden per pixel.

Met de blootstelling per natuurramp, is een logische volgende stap om schade te koppelen aan elk gevaarsniveau en welvaartsniveau, om verder te onderzoeken wat de economische en sociale impact is van deze resultaten.

Als laatste kan het ook interessant zijn om hetzelfde onderzoek uit te voeren, maar dan slechts te focussen op grote steden en hun metropolis. Dit zou andere resultaten op kunnen leveren, gedreven door lokale verschillen in regionale ongelijkheid of grote aanwezigheid van natuurlijke gevaren.

6. Referenties

- Alexander, D. (1993). *Natural Disasters*. UCL Press, London. Geraadpleegd op: 12 mei, 2026. <https://doi.org/10.4324/9781315859149>
- Anderson, M. B. (2000). The impacts of natural disasters on the poor: a background note. *World Development Report*. Geraadpleegd op: 8 mei, 2026. <https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/The%20Impacts%20of%20Natural%20Disasters%20on%20the%20Poor.pdf>
- Arouri, M., Nguyen, C., & Ben Youssef, A. (2015). Natural disasters, household welfare, and resilience: evidence from Rural Vietnam. *World Development*, 70: 59-77. Geraadpleegd op: 8 mei, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.12.017>.
- Baugh, C., Colonese, J., D'Angelo, C., Dottori, F., Neal, J., Prudhomme, C., & Salamon, P. (2026). Global river flood hazard maps. *European Commission, Joint Research Centre*. Geraadpleegd op: 15 februari, 2026. <https://doi.org/10.2905/JRC.VD32YWG>
- Bower, E. R., Badamkar, A., Wong-Parodi, G., & Field, C. B. (2023). Enabling pathways for sustainable livelihoods in planned relocation. *Nature Climate Change*, 13: 919-926. Geraadpleegd op: 21 mei, 2026. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01753-x>
- Chan, N. W., & Parker, D. J. (1996). Response to dynamic flood hazard factors in peninsular Malaysia. *The Geographic Journal*, 162(3): 313-325. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://doi.org/10.2307/3059653>
- Chi, G., Fang, H., Chatterjee, S., & Blumenstock, J. E. (2022). Microestimates of wealth for all low- and middle-income countries. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 119 (3). Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://doi.org/10.1073/pnas.2113658119>
- Dai, R., Qingrui, L., Chen, S., Wang, Z., & Zhang, H. (2019). Review of the Correlation between Earthquake Damage of Underground Structures and Ground Motion Parameters. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 304, 042036. Geraadpleegd op: 2 mei, 2026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/4/042036>
- Dang, N. M., Babel, M. S., & Luong, H. T. (2010). Evaluation of flood risk parameters in the Day River Flood Diversion Area, Red River Delta, Vietnam. *Natural Hazards*, 56: 169-194. Geraadpleegd op: 12 mei, 2026. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9558-x>
- Desai, B., Bresch, D. N., Cazabat, C., Hochrainer-Stigler, S., Mechler, R., Ponserre, S., & Schewe, J. (2021). Addressing the human cost in a changing climate. *Science*, 372(6548): 1284-1287. Geraadpleegd op: 21 mei, 2026. <https://doi.org/10.1126/science.abh4283>
- Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F. A., & Feyen, L. (2016). Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources*, 94: 87-102. Geraadpleegd op: 15 februari, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.05.002>
- Duque, J. C., García, G. A., Lozano-Gracia, N., Quiñones, M., & Montoya, K. Y. (2023). Inequality and space in a highly unequal country: What does the literature tell us in the context of Colombia? *Regional Sciency Policy & Practice*, 15(9): 2065-2087. Geraadpleegd op: 18 mei, 2026. <https://doi.org/10.1111/rsp3.12681>
- Fothergill, A., & Peek, L. A. (2004). Poverty and disasters in the United States: a review of recent sociological findings. *Natural Hazards*, 32: 89-110. Geraadpleegd op: 8 mei, 2026. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000026792.76181.d9>
- Garcia-Delgado, H., Petley, D. N., Bermúdez, M. A., & Sepulvéda, S. A. (2022). Fatal landslides in Colombia (from historical times to 2020) and their socio-economic impacts. *Landslides*, 19(7): 1689-1716. Geraadpleegd op: 21 mei, 2026. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01870-2>
- Gill, J. C., & Malamud, B. D. (2014). Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 52(4): 680-722. Geraadpleegd op: 12 mei, 2026. <https://doi.org/10.1002/2013RG000445>
- Gobierno de Colombia. (2019). *Población indígena de Colombia*. Dane Colombia. Geraadpleegd op: 8 juni, 2026. <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/grupos-etnicos/presentacion-grupos-etnicos-2019.pdf>
- Jimenez, A. A. T. (2025). How Colombian communities are leading the fight against floods. *PreventionWeb*. Geraadpleegd op: 20 mei, 2026. <https://www.preventionweb.net/drr-community-voices/how-colombian-communities-are-leading-fight-against-floods>
- Johnson, K., Villani, M., Bayliss, K., Brooks, C., Chandrasekhar, S., Chartier, T., Chen, Y., Garcia-Pelaez, J., Gee, R., Styron, R., Rood, A., Simionato, M., & Pagani, M. (2023). Global Earthquake Model (GEM) Seismic Hazard Map (version 2023.1 - June 2023). Geraadpleegd op: 15 februari, 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409647>
- Kapuka, A., & Hlásny, T. (2020). Social Vulnerability to Natural Hazards in Namibia: A District-Based Analysis. *Sustainability*, 12(12), 4910. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://doi.org/10.3390/su12124910>
- Kim, N. (2012). How much more are the poor exposed to natural disasters? Global and regional measurement. *Disasters*, 36(2): 195–211. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2011.01258.x>
- Koomen, E., Jacobs-Crisioni, C. G. W., Andrée, B. P. J., & Van Bommel, M. S. (2026). High-resolution modeling of future urban area and population exposure to floods and landslides. *Earth's Future*, 14(1). Geraadpleegd op: 7 mei, 2026. <https://doi.org/10.1029/2025EF006132>

- Magalhães, F., Acosta Restrepo, P., Lonardonì, F., & Moris, R. (2016). *Slum upgrading and housing in South America*. Geraadpleegd op: 18 mei, 2026. <http://dx.doi.org/10.18235/0006473>
- Meiler, S., Chia-Ying, L., Sobel, A. H., & Carargo, S. J. (2026). Global coastal wind hazard maps from the CHAZ tropical cyclone model. *Scientific Data*, 13, 136. Geraadpleegd op: 12 mei, 2026. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-06452-0>
- Mertens, K., & Vranken, L. (2018). Investing in land to change your risk exposure? Land transactions and inequality in a landslide prone region. *World Development*, 110, 437-452. Geraadpleegd op: 20 mei, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.06.015>
- Moreira, L. F. B., Machado, I. F., Smaniotto, N. P., & Maltchik, L. (2025). Out of flood front areas: Wetland restoration may induce internal displacement. *Environmental Science & Policy*, 171, 104146. Geraadpleegd op: 21 mei, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104146>
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Revista Iberoamericana del Agua*, 3(1): 25-33. Geraadpleegd op: 14 mei, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- OECD. (2014). OECD Territorial Reviews: Colombia 2014. *OECD Territorial Reviews*. Geraadpleegd op: 18 mei, 2026. <https://doi.org/10.1787/9789264224551-en>.
- Polanía, D. (2022). Water and sanitation for the poorest communities in Colombia's cities. *The International Water Association*. Geraadpleegd op: 18 mei, 2026. <https://www.iwa-network.org/water-and-sanitation-for-the-poorest-communities-in-colombias-cities>
- PreventionWeb. (2025). Disaster Risk. Geraadpleegd op: 18 mei, 2026. <https://www.preventionweb.net/understanding-disaster-risk/component-risk/disaster-risk>
- Rubiano, D., Jordan, B. M., & Agosti, A. (2025). Stronger before the storm: How Colombia built a system to withstand disaster. *World Bank Blogs*. Geraadpleegd op: 20 mei, 2026. <https://blogs.worldbank.org/en/latinamerica/como-colombia-sistema-mas-resiliente-ante-desastres>
- Simpson, R. H., & Saffir, H. (1974). The hurricane disaster-potential scale. *Weatherwise, American Meteorological Society*. 27(4): 169. Geraadpleegd op: 14 mei, 2026.
- South America Backpacker. (2015). *Exploring the Medellín Slums, Colombia*. Geraadpleegd op: 18 mei, 2026. <https://southamericabackpacker.com/exploring-slums-of-medellin-colombia/>
- The Humanitarian Data Exchange. (2026). *Colombia – Subnational administrative boundaries*. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://data.humdata.org/dataset/geoboundaries-admin-boundaries-for-colombia>
- The Guardian. (2026). *Rainwater harvesting and eco-gardens: how one Colombian neighbourhood helped a whole city plan for climate change*. <https://www.theguardian.com/global-development/2026/apr/17/rainwater-harvesting-and-eco-gardens-how-one-colombian-neighbourhood-helped-a-whole-city-plan-for-climate-change>
- Trogrlić, R. S., Reiter, K., Ciurean, R. L., Gottardo, S., Torresan, S., Daloz, A. S., Ma, L., Fumero, N. D., Tatman, S., Hochrainer-Stigler, S., De Ruiter, M. C., Schlumberger, J., Harris, R., Garcia-Gonzales, S., García-Vaquero, M., Arévalo, T. L. F., Hernandez-Martin, R., Mendoza-Jimenez, J., Mauro Ferrario, D., Geurts, D. (...). (2024). Challenges in assessing and managing multi-hazard risks: A European stakeholder perspective. *Environmental Science & Policy*, 157, 103774. Geraadpleegd op: 20 mei, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103774>
- UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2009). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. ISDR, Geneva. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://www.undrr.org/quick/11049>
- UNEP (United Nations Environment Programme). (2004). Global evaluation of human risk and vulnerability to natural hazards. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8094>
- UNEP. (2024). *To counter climate change, Colombian cities weave nature back into their urban fabric*. Geraadpleegd op: 21 mei, 2026. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/counter-climate-change-colombian-cities-weave-nature-back-their-urban-fabric>
- Villegas, H. (2003). Display of Nevado Del Ruiz volcanic hazard map using GIS. *Geocarto International*, 18(3): 5-13. Geraadpleegd op: 8 mei, 2026. <https://doi.org/10.1080/10106040308542276>
- Wang, X., Nie, G., & D., Wang (2010). Relationships between ground motion parameters and landslides induced by Wenchuan earthquake. *Earthquake Science*, 23: 233-242. Geraadpleegd op: 14 mei, 2026. <https://doi.org/10.1007/s11589-010-0719-5>
- Ward, P. J., Blauhut, V., Bloemendaal, N., Daniell, J. E., de Ruiter, M. C., Duncan, M. J., Emberson, R., Jenkins, S. F., Kirschbaum, D., Kunz, M., Mohr, S., Muis, S., Riddell, G. A., Schäfer, A., Stanley, T., Veldkamp, T. I. E., & Winsemius, H. C. (2020) Review article: Natural hazard risk assessments at the global scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20: 1069–1096. Geraadpleegd op: 12 mei, 2026. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1069-2020>
- World Bank Group. (2024a). *Gini index – Colombia*. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GINI?locations=CO>
- World Bank Group. (2024b). *Global Distribution of National Disasters*. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/colombia/natural-disasters-historical>

World Bank Group. (2025). *Global landslide hazard map*. Geraadpleegd op: 28 april, 2026.
<https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0037584/global-landslide-hazard-map>

Worldpop. (2020). *The spatial distribution of population density in 2020 based on country total adjusted to match the corresponding UNPD estimate, Colombia*. Geraadpleegd op: 28 april, 2026. <https://hub.worldpop.org/doi/10.5258/SOTON/WP00675> / <https://hub.worldpop.org/geodata/summary?id=45716>

Yoon, D. K. (2012). Assessment of social vulnerability to natural disasters: a comparative study. *Natural hazards*, 63: 823-843. Geraadpleegd op: 12 mei, 2026. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0189-2>

Zomer, R., & Trabucco, A. (2025). Future Global Aridity Index and and PET database (CMIP_6). Geraadpleegd op: 12 mei, 2026.
<https://doi.org/10.57760/sciencedb.nbsdc.00086>

Appendix A: exacte analysestappen

Voor deze analyse is er een shapefile nodig van Colombia. Hiervan is de data van The Humanitarian Data Exchange (2026) gebruikt, specifiek de niet-geïmpliceerde geojson van ADM0.

Overstromingsdata

- Clip raster op een shapefile van Colombia
- Classificeer data via Reclassify by table: 0-1 = 0.25, 1-2 = 0.5, 2-30 = 0.75
- Fill Nodata Cells → fill value = 0 (sla op als apart raster, 'volledige overstromingsdata')

Aardverschuivingsdata

- Clip raster op een shapefile van Colombia
- Classificeer data via Reclassify by table: 0-0.001 = 0.25, 0.001-0.01 = 0.5, 0.001-1 = 0.75
- Fill Nodata Cells → fill value = 0 (sla op als apart raster, 'volledige aardverschuivingsdata')

Aardbevingsdata

- Clip raster op een shapefile van Colombia
- Behoud alleen pixels met een waarde van 0.2 of hoger via exporteren → No Data Values
- Classificeer data via Reclassify by table: 0.2-0.35 = 0.25, 0.35-0.5 = 0.5, 0.5-0.8 = 0.75.

Tropische cyclonen

- Clip raster op een shapefile van Colombia
- Classificeer data via Reclassify by table: 0-17.5 = 0, 17.5-32.5 = 0.25, 32.5-50 = 0.5
- Export layer → zet '0' als nodata value

Welvaartsdata

- Interpoleer de puntenwolk van welvaart met TIN-interpolatie om er een raster van te maken, met een grootte van georeferenced units op 0,085.
- Gebruik de 'align rasters' tool om het welvaartsraster op te lijnen met de bevolkingsraster.
- Herclassificeer de rasterkaart met de waardes volgens tabel A.1
- Maak vervolgens nieuwe rasters van elke klasse door voor elke nieuwe waarde exporteer → no data values te doen.
- Deze rasters moet je vervolgens polygonizeren via rasters → polygonize, wat 10 shapefiles moet opleveren.
- Clip de totale bevolkingskaart voor elke welvaarts-shapefile. Op deze manier heb je per welvaartsklasse een raster van mensen die daarin wonen.

Tabel A.1: Waardes om als grenswaardes te hanteren voor elke welvaartsklasse

Welvaartsklasse	Waardes	Nieuwe waarde
0-10%	-3 - -0,52486	1
10-20%	-0,52486000001 - -0,29472	2
20-30%	-0,294720001 – -0,0131	3
30-40%	-0,013100001 – 0,304	4
40-50%	0,30400001 – 0,57345	5
50-60%	0,573450001 – 0,77828	6
60-70%	0,778280001 – 0,9185	7
70-80%	0,91850001 – 1,062365	8
80-90%	1,0623650001 – 1,2165	9
90-100%	1,21650001 - 3	10

Multihazard-analyse:

Via het framework van Gill en Malamud (2014) weten we dat een secundaire hazard met spatial overlap met gemiddeld 85% van de extent overlapt, een middelmatige overlap heeft een overlap van 50%, en een kleine overlap heeft een overlap van 15%. Er worden geen exacte getallen gegeven bij temporele kans, maar we kunnen ervan uit gaan dat een middelmatige temporele kans een kans van 50% betekent, en een hoge temporele kans betekent dat we uit kunnen gaan van 100%. Dit levert de volgende formules op:

Overstromingsrisico: Raster calculator → “Overstromingskaart” + $0.85 * 0.5 * \text{“volledige aardverschuivingskaart”}$.

Reclassify: $0-0.33 = 0.25$ (laag risico), $0.33-0.67 = 0.5$ (middelhoog risico), $0.67-1 = 0.75$ (hoog risico), $1-2 = 1$ (zeer hoog risico)

Cycloonrisico: Raster calculator → “Cycloonrisico” + $0.85 * 1 * \text{“volledige overstromingskaart”}$ + $0.85 * 1 * \text{“volledige aardverschuivingskaart”}$

Reclassify: $0-0.33 = 0.25$ (laag risico), $0.33-0.67 = 0.5$ (middelhoog risico), $0.67-1 = 0.75$ (hoog risico), $1-2 = 1$ (zeer hoog risico)

Aardbevingsrisico: Raster calculator → “Aardbevingskaart” + $0.85 * 1 * \text{“volledige aardverschuivingskaart”}$

Reclassify: $0-0.33 = 0.25$ (laag risico), $0.33-0.67 = 0.5$ (middelhoog risico), $0.67-1 = 0.75$ (hoog risico), $1-2 = 1$ (zeer hoog risico)

In het literatuuronderzoek van Wang (2010) worden veel waardes gegeven over wanneer aardverschuivingen kunnen ontstaan door aardbevingen, maar dit is voor alle waarden niet boven 0,2G. Dit betekent dat we geen threshold-waarde te hoeven hanteren voor hoe zwaar de aardbeving moet zijn om een aardverschuiving teweeg te brengen.

Afronding

-Clip bevolkingsraster op elk welvaartsniveau

-Maak shapefiles van alle risiconiveau's per laag

-Zonal statistics → input: elk risiconiveau voor elke laag, raster: elk bevolkingsraster per welvaartsniveau. Voorbeeld: input = aardbevingen laag risico, raster = 0-10% welvaart.

-Exporteer elke zonal statistic naar excel, en bereken in het excelbestand de som van alle counts. Dit geeft je het aantal mensen dat blootgesteld wordt aan dit gevaar in dit welvaartsniveau. Gebruik deze som om grafieken of tabellen van te maken.

Appendix B: tabellen met resultaten in cijfers

Tabel B.1: Totaal aantal blootgestelde personen voor elk gevaarsniveau voor aardverschuivingen. De kolommen geven de welvaartsniveaus aan, en de rijen geven het gevaarsniveau aan.

Gevaars-niveaus (Aardver- schuivingen)		Welvaartsniveaus									
		0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	80-90%	90-100%
	Middelhoog	670301	721667	704113	619711	578901	709647	641813	616872	671790	703566
	Hoog	1234109	1566498	1367032	1120150	970174	953804	765900	575849	540771	504087

Tabel B.2: Totaal aantal blootgestelde personen voor elk gevaarsniveau voor aardbevingen. De kolommen geven de welvaartsniveaus aan, en de rijen geven het gevaarsniveau aan. Dit is met samengesteld gevaar meegerekend.

Gevaars-niveaus (Aard- bevingen)		Welvaartsniveaus									
		0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	80-90%	90-100%
	Laag	1006466	1209313	1542231	1941195	2099012	2644241	2805815	2787453	2395031	1451619
	Middelhoog	120594	191217	237913	242402	196002	253429	220038	236271	463255	630178
	Hoog	1620714	1895542	1637178	1366796	1097674	1232912	990868	821991	743829	449201
	Zeer hoog	237941	264568	230396	186561	176594	140708	84202	110829	119130	215463

Tabel B.3: Totaal aantal blootgestelde personen voor elk gevaarsniveau voor overstromingen. De kolommen geven de welvaartsniveaus aan, en de rijen geven het gevaarsniveau aan. Dit is met samengesteld gevaar meegerekend.

Gevaars-niveaus (Over- stromingen)		Welvaartsniveaus									
		0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	80-90%	90-100%
	Laag	97929	93192	104519	98598	90976	59095	64160	58779	54350	5385
	Middelhoog	92034	83997	69425	85732	55127	50240	20366	35530	10898	18635
	Hoog	501782	374501	329645	256273	216969	124209	74292	70280	42157	2459
	Zeer hoog	12109	12668	15329	8864	3414	182	0	31	0	0

Tabel B.4: Totaal aantal blootgestelde personen voor elk gevaarsniveau voor tropische cyclonen. De kolommen geven de welvaartsniveaus aan, en de rijen geven het gevaarsniveau aan. Dit is met samengesteld gevaar meegerekend.

		Welvaartsniveaus									
		0-10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	70-80%	80-90%	90-100%
Gevaars-niveaus (Tropische cyclonen)	Laag	602542	611349	692573	747221	805274	764728	721230	807374	1256745	1655856
	Middelhoog	328510	118062	84749	78106	105411	81530	125304	107917	85253	0
	Hoog	536766	510548	544966	492134	425636	444734	246454	310228	376675	371025
	Zeer hoog	4288	6853	7067	9414	4431	43	11	0	0	0

Appendix C: Data en gebruikte code

De code die gebruikt is om delen van deze analyse te doen is te vinden via de volgende link:

<https://drive.google.com/drive/folders/1RIV5SZHf3Fd2rnXGKV3cfyKqV3dPTFpK?usp=sharing>.

In deze code vindt u de methode waarmee de welvaartspercentielen zijn bepaald. Ook bevat de code de tabellen met blootstelling voor alle gevaren, en de code voor hoe deze zijn gebruikt voor het vormen van grafieken en het uitvoeren van lineaire regressies. Het csv-bestand, genaamd 'points', bevat een tabel met alle pixels in het onderzoeksgebied, met bijbehorende bevolkingsdichtheid en welvaartsniveau. Dit is uit te voeren met één klik, mits de paden voor de benodigde data en figuren zijn veranderd in de code naar het lokale systeem.