

CAMBIAMENTO CLIMATICO E VULNERABILITÀ DEMOGRAFICA:

“Un’analisi delle unità territoriali in Emilia-Romagna”

Botticelli Tommaso, Cesari Jacopo, Zecchini Giovanni

Abstract

Il cambiamento climatico sta modificando profondamente il territorio e le dinamiche demografiche, influenzando la distribuzione della popolazione e la sostenibilità delle comunità locali. Questo studio analizza la vulnerabilità territoriale in Emilia-Romagna, individuando i comuni più esposti a fenomeni climatici estremi e valutando il loro impatto sulle tendenze demografiche. Attraverso l’uso di dati ambientali e socio-demografici, è stata condotta un’analisi statistica e una cluster analysis per classificare le unità territoriali in base alla loro esposizione ai rischi climatici e geomorfologici. I risultati evidenziano come fattori quali escursione termica, precipitazioni e altitudine possano incidere sulla densità abitativa, i flussi migratori e la vulnerabilità della popolazione anziana. Lo studio fornisce strumenti analitici utili alla pianificazione di strategie di mitigazione e adattamento, promuovendo una gestione territoriale più resiliente e sostenibile.

1. Introduzione

Il cambiamento climatico è una delle principali sfide globali, con impatti evidenti su ambiente, economia e qualità della vita. L'aumento delle temperature, la variazione delle precipitazioni e gli eventi estremi, come alluvioni e ondate di calore, stanno alterando l'equilibrio socio-demografico. Questi cambiamenti influenzano la qualità della vita, possono causare spostamenti della popolazione, aggravare le disuguaglianze e compromettere la sostenibilità territoriale.

Individuare le aree vulnerabili è essenziale per comprendere l'impatto del cambiamento climatico sulla demografia e per sviluppare strategie di adattamento. L'analisi delle vulnerabilità territoriali consente di identificare i comuni più esposti a fenomeni estremi e di valutare l'impatto sulle dinamiche demografiche, come densità abitativa, flussi migratori e composizione socio-economica, fornendo scenari utili per pianificare interventi mirati e promuovere la resilienza

In questo contesto, la capacità di anticipare gli effetti delle catastrofi naturali attraverso un'attenta analisi dei dati climatici e demografici rappresenta un elemento chiave per una gestione territoriale sostenibile. Agire in modo proattivo significa implementare politiche di prevenzione e adattamento che riducano i danni economici e sociali, garantendo una maggiore sicurezza per la popolazione.

L'obiettivo di questo studio è dunque quello di esaminare il legame tra cambiamento climatico e demografia, individuando le aree più vulnerabili e fornendo strumenti analitici utili per la pianificazione di strategie di mitigazione e adattamento.

2. Analisi esplorativa dei dati

Per l'analisi, sono state utilizzate statistiche descrittive per esaminare una serie di variabili ambientali-climatiche e socio-demografiche.

Le variabili ambientali-climatiche considerate includono: *Superficie territoriale (km²)*, *Altitudine (m)*, *Precipitazioni medie annuali*, *Variazione della temperatura media annuale*, *Temperature massime annuali*, *Escursione termica*, *% Aree a pericolosità idraulica elevata*, *Valore massimo dell'accelerazione del suolo* e *% Area a pericolosità da frana PAI molto elevata e elevata*.

Per quanto riguarda le variabili socio-demografiche, sono stati analizzati: *Popolazione totale*, *Consumo del suolo*, *Età media*, *% Popolazione anziana*, *% Edifici residenziali costruiti dopo il 2005*, *% Edifici residenziali con stato di conservazione pessimo*, *Densità abitativa*, *Tasso di natalità*, *Tasso di mortalità* e *Spopolamento % nel periodo 2004-2023*.

2.1 Statistiche descrittive – analisi univariata

Tabella 1

Statistiche descrittive relative a variabili ambientali e climatiche

Index	Escursione termica	Temperatur e massime annuali	Incremento temperatura media annuale	Precipitazioni medie annuali	Altitudine (m)	Superficie territoriale (kmq)	% Area a Pericolosità da frana elevata	Valore massimo dell'accelerazione del suolo	% Aree a Pericolosità idraulica elevata
std	2.87	2.19	0.64	10.02	256.2	62.85	15.33	33.79	17.04
min	3.13	23.29	-2.3	9.36	0.0	6.0	0.0	70.0	0.0
25%	7.76	30.08	-0.38	20.44	25.0	35.0	0.0	150.0	1.93
50%	10.07	31.73	-0.04	25.52	82.0	49.0	1.61	160.0	5.08
75%	12.34	32.62	0.5	31.49	290.0	81.0	25.06	190.0	14.38
max	18.7	33.14	2.12	101.86	1131.0	652.0	56.14	210.0	100.0

Tabella 2

Statistiche descrittive relative a variabili socio-demografiche

Index	Popolazione totale	Consumo del suolo	Età media	% pop anziana	% Edifici residenziali costruiti dopo il 2005	% Edifici in pessimo stato di conservazione	Densità abitativa	Tasso di natalità %	Spopolamento %	Tasso di mortalità %
std	13504.1	10.24	46.36	24.68	3.48	1.5	221.61	0.63	-4.69	1.65
min	31752.67	7.24	3.82	6.39	2.48	1.41	319.36	0.43	15.77	0.98
25%	69.0	1.26	38.4	12.0	0.0	0.0	3.0	0.0	-69.0	0.41
50%	3262.75	5.34	43.9	21.0	1.77	0.6	52.75	0.0	-15.0	1.02
75%	6324.5	8.78	45.5	23.0	3.01	1.12	139.0	0.75	-6.0	1.27
max	11209.75	12.75	48.0	27.0	4.61	2.02	250.0	0.95	5.0	2.03

2.2 Cluster Analysis

È stata applicata la cluster analysis con il metodo K-Means per segmentare i comuni in gruppi omogenei sulla base di variabili ambientali. Questo approccio ha permesso di distinguere le aree più vulnerabili ai rischi climatici e geomorfologici, facilitando l'analisi della fragilità territoriale e l'elaborazione di strategie di mitigazione e adattamento. La suddivisione in cluster ha reso più chiara l'interpretazione dei modelli sviluppati nelle fasi successive dell'analisi empirica, offrendo un quadro strutturato dei fattori che influenzano la vulnerabilità territoriale e supportando interventi mirati di prevenzione e gestione del rischio. Per determinare il numero ottimale di cluster, sono state impiegate due metriche fondamentali:

- Elbow Method: è stato osservato che la scelta di $k=6$ risultava adeguata, evidenziando un punto di flesso significativo nella curva dell'inertia.
- Indice di Silhouette: è stato confermato che $k=6$ (Figura 1) garantisce una buona coesione interna dei cluster e una chiara separazione tra i gruppi (Figura 2).

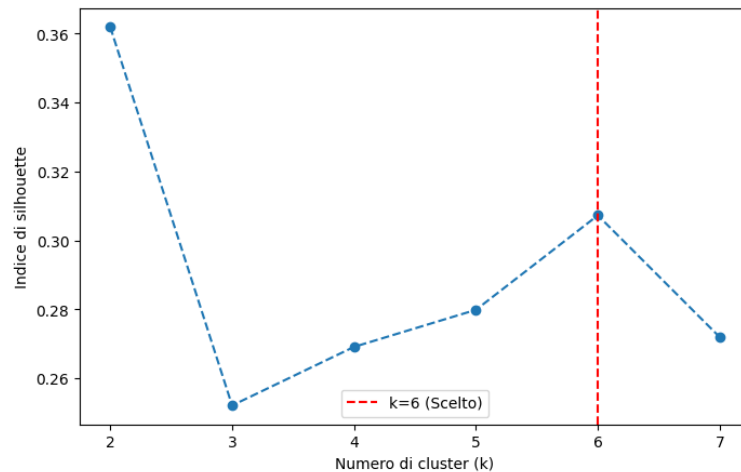


Figura 1. Plot del Silhouette score

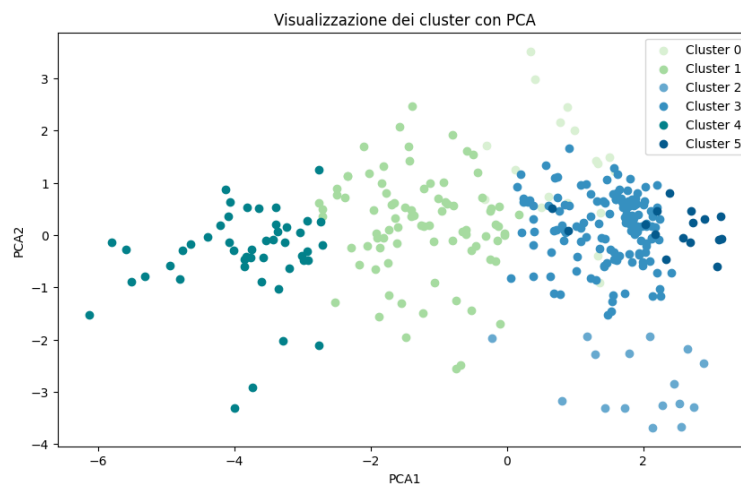


Figura 2. Scatter plot delle Unità Territoriali, e rispettivi cluster, rispetto alle due componenti principali

Dopo aver determinato il numero ottimale di cluster, è stata esaminata la distribuzione delle variabili ambientali tra i gruppi utilizzando un radar plot e analizzando le differenze tra le variabili nei vari cluster. Questo strumento grafico ha consentito di evidenziare le differenze strutturali tra i cluster, facilitando l'identificazione dei profili distintivi di ciascun gruppo e offrendo una rappresentazione chiara delle caratteristiche ambientali che li contraddistinguono.

L'analisi dei cluster ha permesso di identificare gruppi di comuni con caratteristiche ambientali omogenee, mettendo in evidenza differenze rilevanti in termini di vulnerabilità ai rischi climatici e geomorfologici

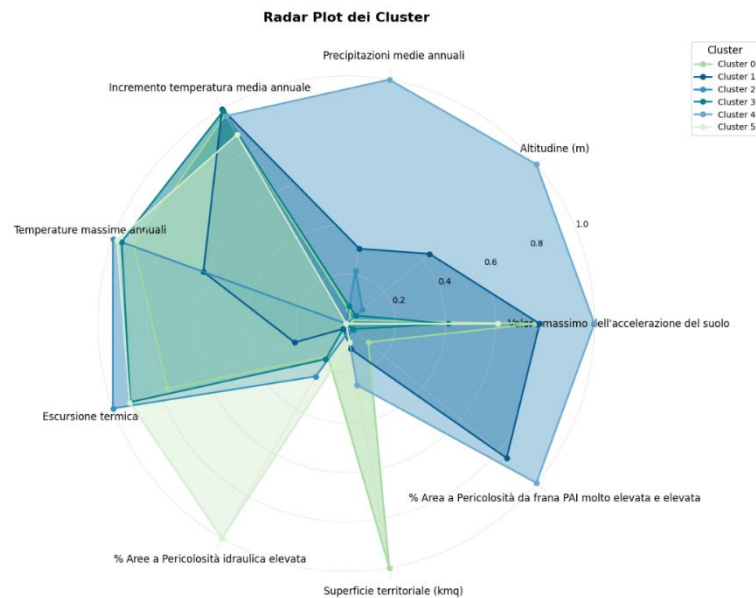
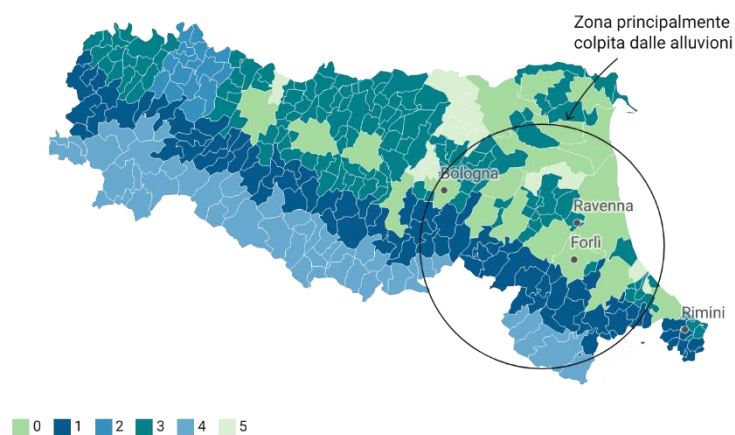


Figura 3. Radar plot dei cluster e rispetto alle variabili ambientali e climatiche

Clusters

Comuni dell'Emilia-Romagna divisi in base a caratteristiche ambientali e climatiche



Source: da eliminare - Created with Datawrapper

Figura 4. GeoMap delle Unità Territoriali e dei rispettivi cluster

Osservando il Radar plot in **Figura 3** e confrontandolo con la Heatmap in **Figura 4** possiamo farci una chiara idea della suddivisione delle Unità Territoriali dal punto di vista geografico e climatico.

- Il Cluster 0 si distingue per un'ampia superficie territoriale, suggerendo che comprenda comuni di grande estensione. Questi territori mostrano un elevato valore massimo dell'accelerazione del suolo, indicando una possibile esposizione a fenomeni sismici. Inoltre, presentano un'elevata escursione termica, temperature massime annuali elevate e un marcato incremento della temperatura media annua. Si tratta prevalentemente di comuni a bassa altitudine, con una limitata esposizione ai principali rischi ambientali.
- Il Cluster 1 mostra un'altitudine intermedia, includendo comuni situati in aree collinari con elevata instabilità geomorfologica. Questi territori presentano un alto rischio di frane e valori significativi dell'accelerazione del suolo, indicando una marcata vulnerabilità strutturale legata alla morfologia del territorio.
- Il Cluster 2 è caratterizzato da un'elevata escursione termica e temperature massime annuali elevate, tipiche di comuni di pianura o di aree interne soggette a forti variazioni di temperatura tra il giorno e la notte. Tuttavia, si evidenziano valori medio-bassi in tutte le variabili analizzate, rappresentando comuni con un livello di rischio ambientale relativamente contenuto. Questi territori non presentano particolari esposizioni a rischi geomorfologici e potrebbero essere considerati aree equilibrate dal punto di vista ambientale.
- Il Cluster 3, presenta caratteristiche simili al cluster precedente, ma si contraddistingue per un valore dell'incremento della temperatura che negli anni è stato un aumento. Tale profilo suggerisce una maggiore vulnerabilità a ondate di calore e a fenomeni climatici estremi.
- Il Cluster 4 comprende comuni a elevata altitudine caratterizzati da alte precipitazioni medie annuali. La presenza di abbondanti piogge suggerisce una potenziale vulnerabilità idrogeologica, rendendo questi territori più esposti a fenomeni di smottamento ed erosione del suolo.
- Il Cluster 5 si distingue per un'elevata pericolosità idraulica, quindi una significativa porzione di territorio esposta al rischio di alluvioni. I comuni appartenenti a questo gruppo sono probabilmente situati lungo i principali corsi d'acqua della regione Emilia-Romagna e risultano particolarmente vulnerabili a inondazioni e piene fluviali.

Di seguito, in **Tabella 3** sono riportate le numerosità dei vari cluster. Successivamente, in **Tabella 4** e in **Tabella 5** sono descritte le principali variabili d'interesse per l'analisi.

Tabella 3

Numerosità dei cluster ottenuti tramite il k-mean clustering

Cluster	N° unità Territoriali
Cluster_0	19
Cluster_1	84
Cluster_2	16
Cluster_3	139
Cluster_4	47
Cluster_6	16

Tabella 4

Valori medi delle variabili ambientali e climatiche per cluster

cluster	Valore massimo dell'accelerazione del suolo	Altitudine (m)	Precipitazioni medie annuali	Incremento temperatura media annuale	Temperature massime annuali	% Edifici residenziali con stato di conservazione pessimo	Escursione termica	% Aree a Pericolosità idraulica elevata	Superficie territoriale (kmq)
0	170.53	32.24	22.92	0.06	32.02	10.58	11.71	235.68	3.64
1	171.55	307.42	28.09	0.06	30.26	9.04	3.11	64.05	26.4
2	124.38	73.97	26.22	-0.03	32.56	11.25	18.3	51.31	1.26
3	149.17	50.75	23.22	0.06	32.34	11.04	12.79	44.24	1.05
4	184.89	679.55	42.4	0.06	26.64	8.42	1.45	92.36	31.29
5	161.25	16.75	21.75	0.05	32.45	11.05	70.03	58.81	0.0

Tabella 5

Valori medi delle variabili socio-demografiche per cluster

cluster	Popolazione totale	Consumo del suolo	Età media	% pop anziana	% Edifici residenziali costruiti dopo il 2005	% Edifici residenziali con stato di conservazione pessimo	Densità abitativa	Tasso di natalità %	Tasso di mortalità %	Spopolamento % 2004-2023
0	95981.63	13.33	46.67	24.75	3.42	1.17	474.06	0.61	1.56	-5.21
1	4701.82	6.0	46.55	24.91	2.91	1.6	84.84	0.62	1.69	-3.51
2	7298.16	9.65	46.1	24.08	2.58	1.5	124.02	0.61	1.63	-0.81
3	12199.14	14.5	44.59	21.8	4.48	1.28	341.66	0.7	1.38	-11.53
4	2665.73	3.84	51.64	33.69	1.39	2.14	32.51	0.45	2.47	14.72
5	11154.46	11.19	45.19	22.5	4.98	1.32	250.01	0.68	1.41	-11.69

3. Analisi empirica – domande di ricerca

Il cambiamento climatico sta trasformando profondamente il territorio e le comunità che lo abitano. Ma in che modo questi mutamenti stanno influenzando le dinamiche demografiche? Perché alcuni comuni si spopolano più velocemente di altri? Qual è il legame tra l'invecchiamento della popolazione e la qualità del patrimonio edilizio? E soprattutto, quali fattori ambientali incidono maggiormente sulla mortalità nella popolazione più anziana?

In questo studio analizziamo la fragilità dei comuni dell'Emilia-Romagna attraverso l'interazione tra ambiente e demografia. Esploriamo come fattori quali condizioni climatiche avverse, rischio idrogeologico e variabilità termica possano determinare differenze significative tra territori, individuando le aree più vulnerabili. Il nostro obiettivo è fornire una visione chiara e strutturata di questi fenomeni, aiutando a comprendere quali territori siano più esposti e quali strategie possano essere adottate per affrontare le sfide future.

3.1 Quali fattori ambientali caratterizzano le aree soggette a spopolamento?

Quali variabili ambientali distinguono i territori maggiormente colpiti dal fenomeno del depopolamento? Esistono pattern ricorrenti che possono aiutare a prevedere e contrastare questa tendenza?

La presente analisi valuta l'influenza dei fattori climatici e ambientali sul fenomeno dello spopolamento attraverso un modello lineare, in cui la variabile dipendente è il tasso di spopolamento e le variabili indipendenti includono diversi indicatori di carattere climatico e geomorfologico.

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	Spopolamento % 2004-2023	R-squared:	0.410			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.399			
Method:	Least Squares	F-statistic:	36.37			
Date:	Tue, 18 Mar 2025	Prob (F-statistic):	2.24e-33			
Time:	13:52:37	Log-Likelihood:	-1256.0			
No. Observations:	321	AIC:	2526.			
Df Residuals:	314	BIC:	2552.			
Df Model:	6					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
		coef	std err	t	P> t	[0.025 0.975]

const		17.8180	10.743	1.659	0.098	-3.319 38.955
Valore massimo dell'accelerazione del suolo		-0.1257	0.023	-5.546	0.000	-0.170 -0.081
Altitudine (m)		0.0162	0.005	3.450	0.001	0.007 0.026
Precipitazioni medie annuali		0.5332	0.156	3.423	0.001	0.227 0.840
Incremento temperatura media annuale		-74.5469	27.404	-2.720	0.007	-128.465 -20.629
Escursione termica		-1.9053	0.775	-2.459	0.014	-3.430 -0.381
Superficie territoriale (kmq)		0.0481	0.011	4.328	0.000	0.026 0.070
=====						
Omnibus:	41.298	Durbin-Watson:	1.955			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	89.340			
Skew:	-0.665	Prob(JB):	3.98e-20			
Kurtosis:	5.216	Cond. No.	1.43e+04			

Figura 5. Summary del modello OLS

L'output del modello in **Figura 5** evidenzia come un aumento dell'escursione termica giornaliera sia associato a una riduzione del tasso di spopolamento, con un coefficiente pari a -1.90. Questo risultato suggerisce che variazioni termiche giornaliere moderate non rappresentano un elemento penalizzante per la residenzialità, ipotizzando che tali condizioni possano essere compatibili con un ambiente vivibile. Al contrario, una maggiore variabilità della temperatura media annuale risulta significativamente correlata a una riduzione dello spopolamento, con un coefficiente pari a -74.55, indicando che comuni dove generalmente si è presentato un aumento della temperatura media annuale non sono stati soggetti a spopolamento.

In contrasto, le precipitazioni medie annuali risultano associate a un aumento dello spopolamento, con un coefficiente di 0.53. Questo dato suggerisce che un'elevata piovosità possa costituire un fattore deterrente, probabilmente a causa delle sue implicazioni sulla qualità della vita, sulle infrastrutture o sulla stabilità geomorfologica del territorio. Anche l'altitudine mostra un effetto positivo sullo spopolamento, con un coefficiente di 0.016, indicando che le aree situate a quote più elevate tendono a subire una maggiore perdita di popolazione, presumibilmente a causa delle condizioni climatiche più rigide e della minore accessibilità ai servizi. Un effetto analogo si osserva per la superficie territoriale, che presenta un coefficiente di 0.048, suggerendo che i comuni con un'estensione maggiore risultano più soggetti a spopolamento, probabilmente a causa della dispersione delle infrastrutture e della ridotta densità abitativa.

Un risultato particolarmente interessante riguarda il valore massimo dell'accelerazione del suolo, che presenta un coefficiente negativo pari a -0.126. Questo dato indica che le aree con minore attività sismica tendono a registrare un tasso di spopolamento più elevato, un risultato che potrebbe derivare dall'adozione di misure di mitigazione del rischio e da investimenti infrastrutturali nelle aree sismicamente attive, contribuendo a una maggiore resilienza territoriale e a una minore propensione all'abbandono.

È doveroso specificare che, pur essendo risultata significativa, la variabile relativa alla pericolosità da frana è stata esclusa dal modello per migliorare l'interpretabilità dei risultati. La sua inclusione avrebbe potuto introdurre complessità interpretative, limitando la chiarezza dell'analisi sulle principali determinanti dello spopolamento.

3.2 In che modo l'età anziana della popolazione si lega allo stato degli edifici e alla vulnerabilità ambientale?

Esiste una relazione tra l'invecchiamento della popolazione e le condizioni del patrimonio edilizio, in termini di epoca di costruzione e stato di conservazione? Inoltre, come incidono i fattori di fragilità naturale, come il rischio idrogeologico e le precipitazioni, sulla sicurezza e sulla qualità della vita nelle aree più anziane?

Per rispondere a questo quesito, la variabile di interesse è stata la percentuale di popolazione anziana ("% pop anziana"), che rappresenta la proporzione di individui con età superiore ai 65 anni rispetto alla popolazione totale del comune. Le variabili esplicative considerate appartengono a due principali categorie: ambientali e strutturali.

Le variabili ambientali considerate includono: Valore massimo dell'accelerazione del suolo, % *Area a pericolosità idraulica elevata*, % *Area a pericolosità da frana PAI molto elevata ed elevata*; *Mesi caldi* e *Mesi freddi*, che sono definiti come il numero di osservazioni mensili della temperatura che rientrano rispettivamente nel 5% superiore e inferiore della distribuzione per ciascun comune; infine, *Grandi piogge* e *Siccità*, che vengono misurate in base al numero di osservazioni mensili delle precipitazioni che si collocano, rispettivamente, nel 5% superiore e inferiore della distribuzione.

Inoltre, sono state incluse variabili indicative del degrado urbano, nello specifico: *Spopolamento % 2004-2023*, % *Edifici residenziali con stato di conservazione pessimo* e % *Edifici residenziali costruiti dopo il 2005*.

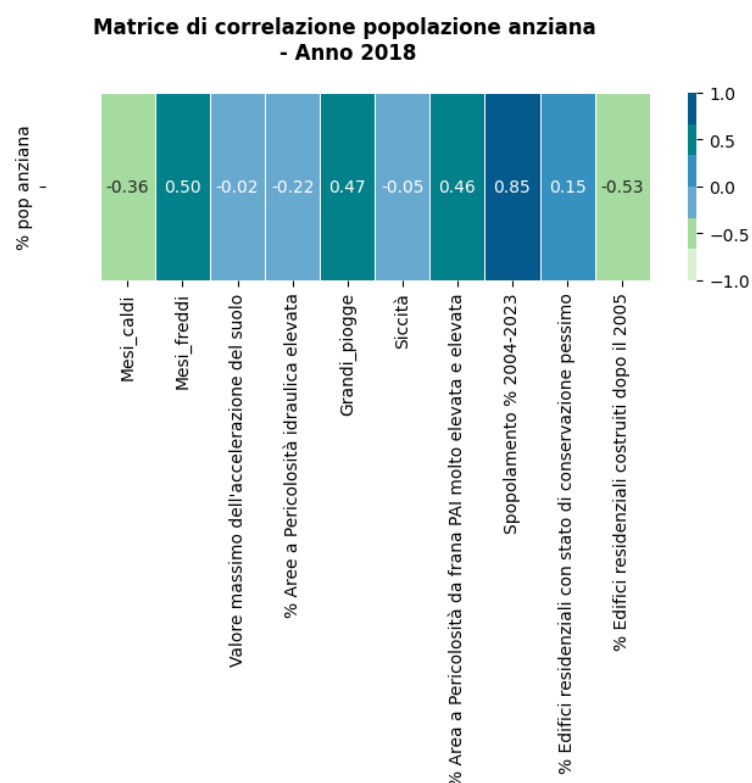


Figura 6. Matrice di correlazione

In un primo momento, è stata condotta un'analisi di correlazione tra la variabile dipendente e le variabili indipendenti. Come si può osservare in **Figura 6** i risultati evidenziano una correlazione significativa tra la percentuale di popolazione anziana e diverse variabili esplicative. In particolare, si osserva una correlazione negativa con % *Edifici residenziali*

costruiti dopo il 2005, suggerendo che nei comuni con una maggiore presenza di popolazione anziana vi sia una minore incidenza di edifici di recente costruzione. Viceversa, la variabile Spopolamento presenta una correlazione positiva, indicando che i comuni caratterizzati da un'elevata percentuale di popolazione anziana tendono a mostrare un declino demografico. Inoltre, emerge una correlazione significativa con le variabili climatiche *Mesi caldi* e *Mesi freddi*, che rappresentano condizioni di temperature estreme. Questo risultato suggerisce una possibile tendenza della popolazione anziana a risiedere in aree caratterizzate da temperature più rigide.

Successivamente, come mostrato in **Figura 7**, è stato stimato un modello di regressione lineare, mantenendo le stesse variabili indipendenti. È stata applicata una trasformata logaritmica alla variabile dipendente per meglio rappresentare la sua distribuzione. Inoltre, la variabile *Spopolamento* è stata inserita anche in forma quadratica, al fine di modellare un possibile effetto non lineare. A seguito della stima del modello completo, le variabili risultate statisticamente significative sono *Mesi caldi*, *Mesi freddi* e *Spopolamento*, confermando i segnali di correlazione osservati in precedenza. Inoltre, anche la variabile *Siccità*, che quantifica il numero di mesi con precipitazioni estremamente ridotte, risulta significativa e mostra un coefficiente positivo rispetto alla percentuale di popolazione anziana. Questo risultato suggerisce che i comuni con una maggiore presenza di popolazione anziana siano anche quelli più esposti a periodi di siccità prolungata.

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	% pop anziana	R-squared:	0.834			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.831			
Method:	Least Squares	F-statistic:	316.0			
Date:	Mon, 17 Mar 2025	Prob (F-statistic):	2.11e-120			
Time:	15:58:05	Log-Likelihood:	330.58			
No. Observations:	321	AIC:	-649.2			
Df Residuals:	315	BIC:	-626.5			
Df Model:	5					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

const	3.2474	0.009	373.837	0.000	3.230	3.264
Mesi_caldi	-0.0220	0.006	-3.937	0.000	-0.033	-0.011
Mesi_freddi	0.0345	0.012	2.820	0.005	0.010	0.059
Siccità	0.0627	0.020	3.080	0.002	0.023	0.103
Spopolamento % 2004-2023	0.0117	0.000	31.704	0.000	0.011	0.012
Spopolamento % 2004-2023^2	8.629e-05	1.12e-05	7.712	0.000	6.43e-05	0.000
=====						
Omnibus:	4.551	Durbin-Watson:	2.097			
Prob(Omnibus):	0.103	Jarque-Bera (JB):	4.531			
Skew:	0.202	Prob(JB):	0.104			
Kurtosis:	3.419	Cond. No.	2.25e+03			
=====						

Figura 7. Summary del modello OLS

In conclusione, i risultati suggeriscono una relazione significativa tra l'invecchiamento della popolazione e fattori sia ambientali che strutturali. I comuni con una maggiore percentuale di popolazione anziana tendono a presentare un declino demografico (spopolamento) e una minore incidenza di edifici di recente costruzione. Inoltre, la popolazione anziana sembra essere più concentrata in aree caratterizzate da temperature estreme, come indicato dai mesi caldi e freddi, e da condizioni climatiche avverse, quali siccità prolungata. Questi risultati evidenziano come l'invecchiamento demografico possa essere strettamente legato alla vulnerabilità ambientale e al degrado urbano.

Percentuale popolazione over 65 (2018)

Il cerchio rappresenta l'area con più alto indice di fragilità.

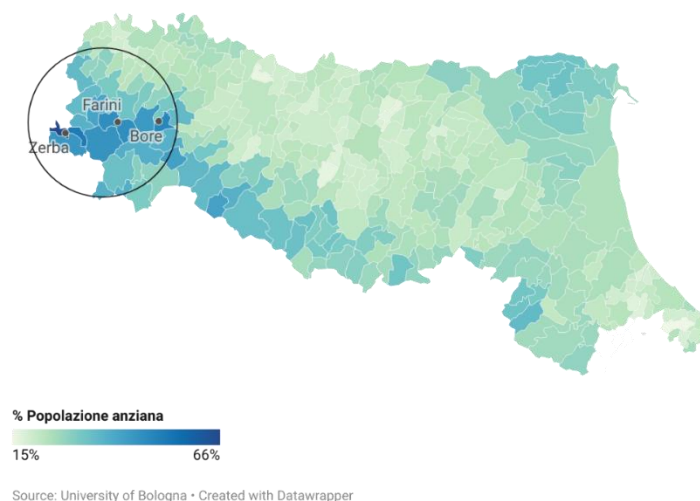


Figura 8. GeoMap della percentuale di popolazione anziana per Unità Territoriale

3.3 Quali sono i principali fattori ambientali che influenzano la mortalità nella popolazione anziana (over 65)?

Quali variabili ambientali risultano più determinanti nell'incidenza della mortalità tra gli over 65? È possibile individuare indicatori predittivi utili a sviluppare strategie di prevenzione e intervento?

L'analisi ha indagato i principali fattori ambientali associati alla mortalità nella popolazione anziana (65+), considerata la fascia più vulnerabile agli effetti delle condizioni climatiche e territoriali. Per questo scopo, sono stati costruiti due modelli Logit basati sul tasso di mortalità 65+, in cui la variabile dipendente è stata trasformata in una variabile dicotomica:

- Nel primo modello, il valore 1 è stato assegnato ai comuni appartenenti al 2% con il tasso di mortalità più elevato.

- Nel secondo modello, il valore 1 corrisponde ai comuni nel 2% con il tasso di mortalità più basso.

Le variabili indipendenti utilizzate sono di natura ambientale. Di seguito si riportano gli odds ratio significativi per ciascun modello.

3.3.1 Modello 1: Fattori associati a un tasso di mortalità 65+ più elevato

Il modello finale ottenuto presenta uno pseudo R^2 pari a 0.18, indicando una moderata capacità esplicativa della variabilità nei tassi di mortalità della popolazione anziana.

I risultati riportati in **Figura 9** evidenziano che l'incremento della temperatura media annuale ($OR = 1.22$) è significativamente associato a un aumento del rischio di mortalità nella popolazione anziana. Questo suggerisce che le variazioni termiche possano rappresentare un fattore di stress rilevante per questa fascia di età, con potenziali effetti negativi sulla salute e sul benessere. Un ulteriore elemento di interesse è rappresentato dall'escursione termica ($OR = 1.04$), la quale risulta anch'essa correlata a un incremento del rischio di mortalità. Al contrario, un aumento della temperatura massima media annuale ($OR = 0.58$) appare associato a una riduzione della probabilità di alta mortalità, suggerendo che condizioni climatiche più miti possano esercitare un effetto protettivo nei confronti della popolazione anziana, potenzialmente mitigando gli effetti negativi delle fluttuazioni termiche. Questo risultato potrebbe essere anche influenzato dalla distribuzione geografica, poiché le temperature più basse si riscontrano generalmente in aree montane, caratterizzate da una maggiore fragilità ambientale e socio-economica. Infine, fattori come la superficie territoriale ($OR = 0.99$) e l'altitudine ($OR = 0.99$) mostrano effetti minimi sulla mortalità, suggerendo che il loro impatto sia meno rilevante rispetto a quello dei fattori climatici.

Odds ratios

const	1.962457e+06
Valore massimo dell'accelerazione del suolo	9.865023e-01
Altitudine (m)	9.987250e-01
Incremento temperatura media annuale	1.222999e+00
Temperature massime annuali	5.838241e-01
Escursione termica	1.037245e+00
Superficie territoriale (kmq)	9.950385e-01
% Area a Pericolosità da frana PAI molto elevata e elevata	1.034355e+00

Figura 9. Odds ratios del Modello 1

3.3.2 Modello 2: Fattori associati a un tasso di mortalità 65+ più basso

Anche il secondo modello presenta uno pseudo R^2 pari a 0.18, indicando una moderata capacità esplicativa della variabilità nei tassi di mortalità della popolazione anziana. Dai risultati illustrati in **Figura 10** emerge che i comuni con un significativo incremento della temperatura media annuale ($OR = 0.37$) presentano una minore probabilità di registrare bassi tassi di mortalità, confermando il ruolo negativo delle temperature in aumento sulla salute della popolazione anziana. Al contrario, nei comuni caratterizzati da elevate precipitazioni medie annuali ($OR = 1.02$) si osserva una lieve associazione con una maggiore probabilità di bassi tassi di mortalità, suggerendo un possibile effetto moderatore delle precipitazioni sui rischi ambientali. Inoltre, i comuni con marcata escursione termica ($OR = 0.97$) sembrano mostrare una riduzione della probabilità di bassi tassi di mortalità, confermando il potenziale impatto negativo di sbalzi termici elevati. Un ulteriore aspetto rilevante riguarda la superficie territoriale ($OR = 0.95$), che presenta una lieve correlazione negativa con la probabilità di bassi tassi di mortalità. Questo risultato potrebbe essere attribuito a fattori quali l'accessibilità ai servizi sanitari, che nei territori più vasti potrebbe essere meno efficiente, influenzando negativamente le condizioni di salute della popolazione. Infine, la percentuale di area a pericolosità da frana PAI molto elevata ed elevata ($OR = 1.04$) risulta associata a una maggiore probabilità di bassi tassi di mortalità. Tale risultato potrebbe riflettere un adattamento della popolazione residente in aree a rischio, dove la presenza di infrastrutture e misure preventive potrebbe contribuire a mitigare l'impatto dei rischi geologici sulla salute pubblica.

Odds ratios	
const	39.833952
Valore massimo dell'accelerazione del suolo	0.986997
Altitudine (m)	0.999427
Precipitazioni medie annuali	1.022616
Incremento temperatura media annuale	0.365957
Temperature massime annuali	0.884368
Escursione termica	0.967602
% Aree a Pericolosità idraulica elevata	0.946441
Superficie territoriale (kmq)	0.953730
% Area a Pericolosità da frana PAI molto elevata e elevata	1.041637

Figura 10. Odds ratios del Modello 2

L'analisi mostra che l'incremento della temperatura media annuale e l'escursione termica sono associati a un aumento della mortalità nella popolazione anziana, mentre temperature massime più elevate sembrano correlate a una minore mortalità. Le precipitazioni medie annuali mostrano una lieve associazione con un aumento della probabilità di bassi tassi di mortalità. La superficie territoriale è debolmente correlata a una maggiore mortalità,

mentre la percentuale di area a pericolosità da frana PAI molto elevata ed elevata risulta associata a una minore mortalità.

3.4 Quali comuni sono maggiormente esposti ai rischi naturali?

In che modo le variabili ambientali e il rischio naturale influenzano la vulnerabilità dei comuni? Quali territori si distinguono per un grado maggiore di fragilità e come possiamo utilizzare questi dati per orientare politiche di gestione e prevenzione più efficaci?

L'Indice di Rischio Ambientale è stato elaborato per quantificare il livello di esposizione dei comuni a diversi fattori di rischio, tra cui quelli sismici, idrogeologici e legati al cambiamento climatico. Le variabili considerate includono: *incremento della temperatura media annuale, la percentuale di area a pericolosità idraulica elevata, il valore massimo dell'accelerazione del suolo, la percentuale di area classificata a pericolosità da frana PAI molto elevata ed elevata, la frequenza delle grandi piogge e dei periodi di siccità, il numero di mesi caldi e freddi.*

Le variabili *Grandi piogge, Siccità, Mesi caldi e Mesi freddi* rappresentano il numero di osservazioni per Unità Territoriale che rientrano nel 5% superiore e inferiore, rispettivamente, della distribuzione delle Precipitazioni medie mensili e della Temperatura media mensile.

L'indice mira a combinare vari indicatori in un unico punteggio, fornendo una misura sintetica e facilmente confrontabile tra i territori. Le variabili selezionate vengono normalizzate tramite lo Z-Score, permettendo una valutazione coerente della specifica esposizione di ogni comune al rischio. Il punteggio finale di ciascun comune si ottiene sommando i valori normalizzati, creando un indicatore complessivo di rischio. Questo sistema consente di classificare i comuni in base alla loro vulnerabilità, identificando le aree più esposte e favorendo interventi mirati per la prevenzione e mitigazione del rischio.

Indice di Rischio Ambientale

L'indicatore è calcolato come media degli score di rischio ambientale dal 2004 al 2023.

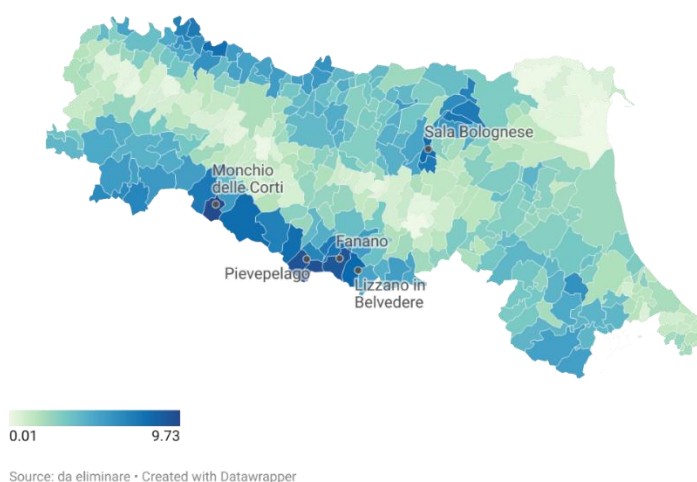


Figura 11. GeoMap dell'Indice di rischio ambientale

A supporto di questa analisi, è stata realizzata una heatmap che evidenzia i comuni più vulnerabili rispetto alle variabili scelte, mettendo in evidenza quali fattori ambientali risultano particolarmente critici per ciascun territorio. Ad esempio, comuni come Corniglio, Fanano, Monchio delle Corti e Ventasso e presentano valori molto elevati per il parametro relativo alle piogge, indicando un'elevata esposizione al rischio di alluvione. Calderara di Reno, Galliera, Poggio Renatico e Sala Bolognese, invece, si distinguono per una maggiore vulnerabilità ai rischi idraulici. Castelvetro Piacentino risulta maggiormente influenzato da condizioni climatiche estreme per quanto riguarda la scarsità di piogge, a danno dell'agricoltura.

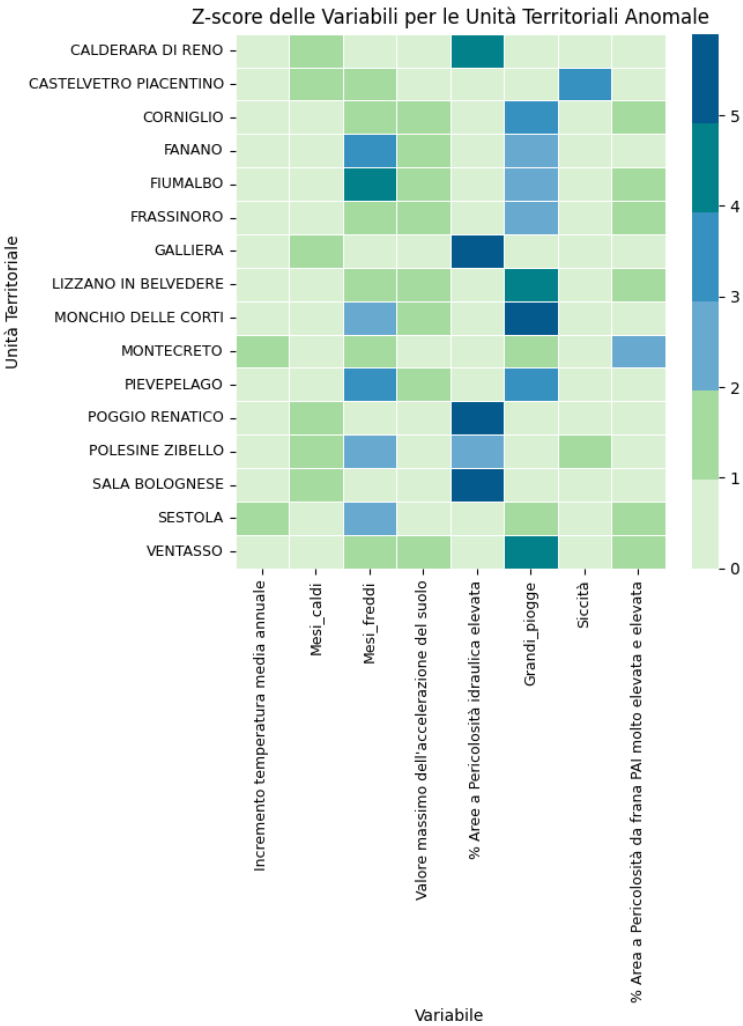


Figura 10. Heatmap dei comuni con maggiore Indice di rischio ambientale rispetto alle variabili utilizzate per calcolare l'indice stesso

Questa analisi consente quindi di identificare specifiche criticità per ogni comune, permettendo di sviluppare strategie di adattamento mirate in funzione delle peculiarità territoriali.

4. Conclusioni

I principali cambiamenti demografici in Emilia-Romagna sono stati influenzati da una combinazione di fattori ambientali, climatici e territoriali?

L'aumento della temperatura media annuale, non avendo un impatto diretto e immediato sulle condizioni di vita della popolazione, non può essere considerato una causa determinante delle dinamiche demografiche.

Le aree a rischio di frane (Figura 11) ad elevata pericolosità sismica (Figura 12) e sono generalmente caratterizzate da piccoli comuni, che spesso affrontano una situazione di invecchiamento demografico e maggiore vulnerabilità socioeconomica. Queste zone sono più sensibili ai disastri naturali a causa della bassa densità di popolazione e delle difficoltà di accesso ai servizi e alle infrastrutture, a causa della loro lontananza dai grandi centri urbani. La combinazione di un'alta percentuale di popolazione anziana e la scarsità di risorse economiche e sociali rende queste aree particolarmente vulnerabili.

Percentuale di area con rischio frane molto elevato

I comuni evidenziati hanno sia un alto rischio naturale che molti edifici in condizioni pessime

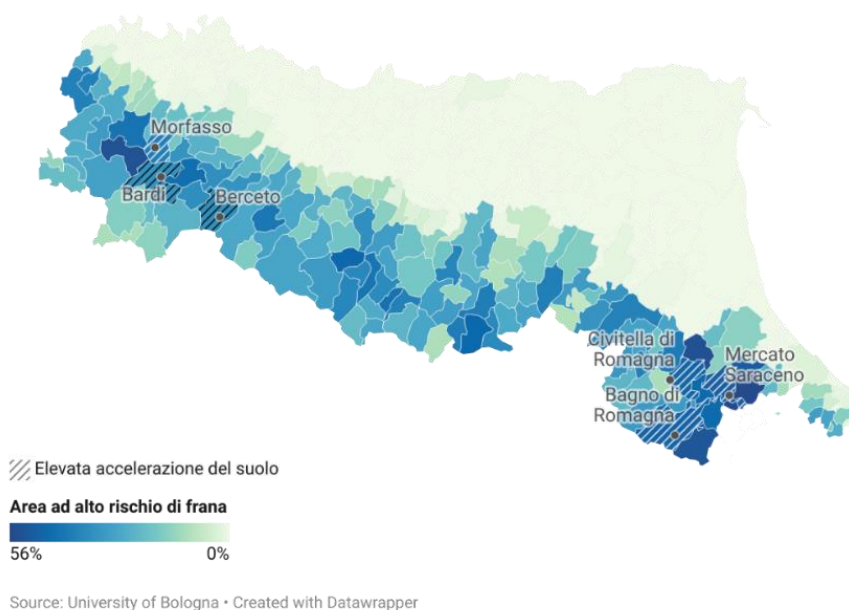


Figura 11. Geomap delle aree con percentuale di rischio frane molto elevato

Valore massimo dell'accelerazione del suolo

I comuni evidenziati hanno sia un alto rischio naturale che molti edifici in condizioni pessime

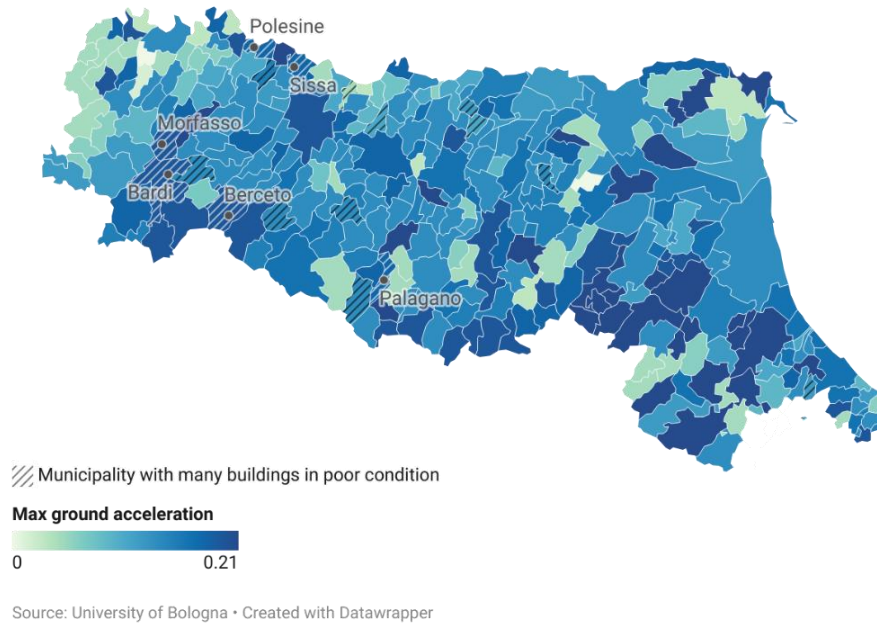


Figura 12. Geomap del valore massimo dell'accelerazione del suolo

Per quanto riguarda i rischi idraulici (Figura 13), questi si concentrano prevalentemente nei grandi centri urbani (Figura 14), caratterizzati da una densità abitativa elevata e da un'ampia estensione di superfici impermeabili. Sebbene gli eventi idraulici estremi, come le inondazioni, siano meno frequenti (Figura 15), la loro intensità e la capacità di generare danni significativi rappresentano un fattore di criticità per la resilienza territoriale. Questi eventi possono causare danni ingenti non solo alle infrastrutture e alle abitazioni, ma anche alle attività economiche e ai servizi essenziali.

Percentuale di area con alto rischio idraulico

I comuni evidenziati hanno sia un alto rischio naturale che molti edifici in condizioni pessime

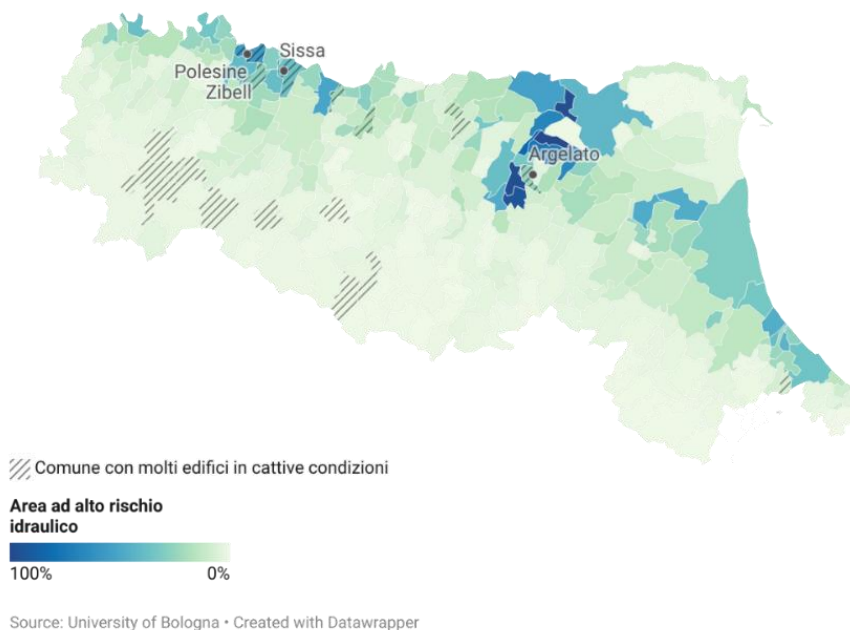


Figura 13. Geomap dei Comuni con alta percentuale di rischio idraulico



Figura 14. Geomap dei Comuni più colpiti dalle alluvioni

Grandi piogge

L'indicatore mostra la frequenza di forti precipitazioni

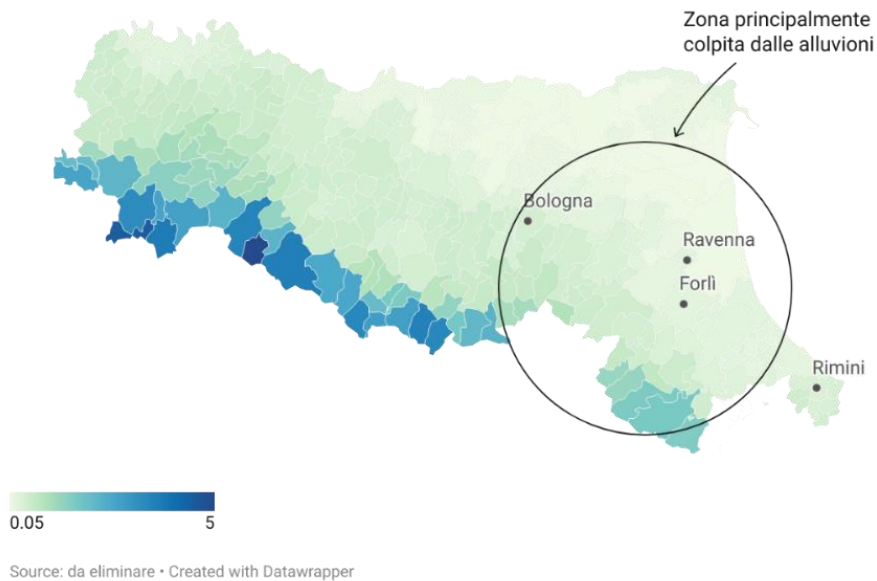


Figura 15. Geomap dei Comuni per frequenza di grandi piogge

Le analisi condotte evidenziano come le variabili ambientali e territoriali influenzino la vulnerabilità dei comuni, con impatti diretti sullo spopolamento, sull'invecchiamento della popolazione e sulla mortalità. L'altitudine, l'alta piovosità e l'ampia estensione territoriale sono associati a un maggiore declino demografico, mentre nei comuni dove la variabilità della temperatura annuale è più alta questo fenomeno sembra attenuato. Le aree sismiche, invece, presentano tassi di spopolamento inferiori, che potrebbero essere giustificati da investimenti infrastrutturali e politiche di mitigazione del rischio.

La presenza di popolazione anziana, inoltre, risulta strettamente legata a condizioni abitative più precarie e a vulnerabilità climatiche accentuate, come temperature estreme e siccità. La mancanza di edifici recenti in comuni con una forte presenza di anziani evidenzia la necessità di interventi infrastrutturali per migliorare la qualità della vita nelle aree più fragili e incentivare un aumento di popolazione giovanile.

Per quanto riguarda la mortalità, l'aumento delle temperature e le escursioni termiche risultano fattori di rischio per la popolazione anziana, insieme alle precipitazioni. Inoltre, la vulnerabilità delle aree rurali più estese potrebbe richiedere un potenziamento delle infrastrutture sanitarie, o altri interventi per facilitare l'accesso ai servizi medici.

Infine, l'Indice di Rischio Ambientale offre uno strumento utile per orientare politiche di prevenzione e gestione del rischio. Le aree vulnerabili a eventi estremi, come alluvioni e

siccità, necessitano di interventi specifici nella pianificazione territoriale, per garantire la sicurezza e la resilienza delle comunità.

L'utilizzo di questi dati consente di sviluppare piani di adattamento climatici efficaci, promuovendo un uso sostenibile delle risorse naturali e migliorando la qualità della vita nelle zone più esposte.