

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO D.I.C.A.M.

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

ELABORATO DELLA PROVA FINALE

in

Gestione delle Risorse Idriche M

**Evoluzione spazio-temporale della distribuzione della
popolazione in relazione ad eventi alluvionali.**

I casi di India e Regno Unito.

CANDIDATA

Arianna Ridolfi

RELATORE

Dott.ssa Ing. Serena Ceola

CORRELATORE

Prof. Alberto Montanari

Sessione III

Anno Accademico 2018/2019

*"Il fiume degli eventi ristagna
e non si sa quale direzione prenderà,
e andiamo alla deriva in acque torbide.
Poi l'acqua diventa limpida,
il torrente scorre,
e tutto torna trasparente."*

S. Benni

Indice

1. Introduzione	19
2. Dati.....	25
2.1 Eventi alluvionali: Dartmouth Flood Observatory	25
2.2 Popolazione: luminosità notturna artificiale	26
3. Metodologia	29
3.1 Criteri per l'identificazione di nazioni ad alto rischio alluvionale.....	29
3.1.1 Numerosità di eventi alluvionali	30
3.1.2 Estensione delle aree alluvionate	31
3.1.3 Durata degli eventi alluvionali	32
3.1.4 Densità di popolazione.....	32
3.1.5 Risultati finali.....	33
3.1.6 Strumenti socio-economici	36
3.2 Analisi statistica di cluster spazio-temporali.....	40
3.2.1 Applicazione della tau statistic per analizzare l'evoluzione spazio-temporale della popolazione in seguito ad eventi alluvionali	42
3.3 Analisi in QGIS.....	46
3.3.1 Il software	46
3.3.2 Preparazione dei dati ed impostazione del progetto.....	48
3.3.3 Operazione di buffering	52
3.3.4 Statistiche raster	55
3.3.5 Statistiche zonali	57
3.3.6 Script Python in QGIS	59
3.4 Analisi in Matlab	63

4. Risultati.....	65
4.1 India.....	65
4.1.1 Inquadramento geografico e demografico	68
4.1.2 Applicazione della metodologia tau-statistic per eventi alluvionali registrati in India: analisi dei risultati	71
4.2 Regno Unito.....	126
4.2.1 Inquadramento geografico e demografico	128
4.2.2 Applicazione della metodologia tau-statistic per eventi alluvionali registrati in Regno Unito: analisi dei risultati	131
5. Conclusioni.....	167
6. Appendice	173
6.1 Approfondimento: il codice Matlab.....	173
6.2 Studio del segno della funzione tau-statistic.....	178
Bibliografia.....	179

Indice delle Figure

Figura 1. Disastri avvenuti nel periodo 1997-2017 divisi per tipologia.....	20
Figura 2. Influenza del reddito nei disastri correlati al clima.	22
Figura 3. Immagine esemplificativa di dati di luminosità notturna artificiale.	28
Figura 4. Paesi ordinati per numero di piene nel periodo 1992-2013, secondo l'archivio del Dartmouth Flood Observatory.....	30
Figura 5. Livelli di rischio di inondazione stimati a partire da quattro indicatori: numero di piene, estensione di piene, durata di piene e densità di popolazione.	34
Figura 6. Diagramma a blocchi che sintetizza il calcolo delle densità di luminosità notturna artificiale locale e totale.....	43
Figura 7. Esempio di evoluzione temporale dei valori medi areali di NTL per la piena 3854.44	
Figura 8. Proprietà. Simbologia. Categorizzato.....	51
Figura 9. Proprietà. Etichette Singole.	52
Figura 10. Finestra impostazione buffer.	53
Figura 11. Esempi di buffer in India e Regno Unito.	54
Figura 12. Raster. Calcolatore Raster.....	56
Figura 13. Strumenti di geoprocessing. Analisi raster. Statistiche raster.	56
Figura 14. Strumenti di geoprocessing. Analisi raster. Statistiche zonali.	58
Figura 15. Calcolatore di campi.....	58
Figura 16. Localizzazione piene e buffer a 10km e 50km.	60
Figura 17. Verifica buffer a 10km.....	61
Figura 18. Verifica buffer a 50km.....	61
Figura 19. India, cartina politica e fisica.....	68
Figura 20. Localizzazione del Ghaghara.	70

Figura 21. India. Immagine satellitare con localizzazione dei centroidi delle aree inondate.	72
Figura 22. Localizzazione della regione dell'Himachal Pradesh.	73
Figura 23. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione dell'Himachal Pradesh.	74
Figura 24. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3983 avvenuto nel 2012 nella regione dell'Himachal Pradesh.	75
Figura 25. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità artificiale notturna per l'evento alluvionale id: 3983 avvenuto nel 2012 nella regione dell'Himachal Pradesh.	75
Figura 26. Localizzazione della regione del Bihar.	76
Figura 27. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione del Bihar.	77
Figura 28. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2507 avvenuto nel 2004 nella regione del Bihar.	78
Figura 29. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id:2507 avvenuto nel 2004 nella regione del Bihar.	78
Figura 30. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3854 avvenuto nel 2011 nella regione del Bihar.	79
Figura 31. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id:3854 avvenuto nel 2011 nella regione del Bihar.	80
Figura 32. Localizzazione della regione di Assam.	80
Figura 33. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Assam.	81
Figura 34. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1606 avvenuto nel 2000 nella regione di Assam.	83
Figura 35. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1606 avvenuto nel 2000 nella regione di Assam.	83

Figura 36. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2248 avvenuto nel 2003 nella regione di Assam.	84
Figura 37. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali delle densità di luminosità artificiale notturna per l'evento alluvionale id: 2248 avvenuto nel 2003 nella regione di Assam.	85
Figura 38. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3636 avvenuto nel 2010 nella regione di Assam.	85
Figura 39. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali della luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3636 avvenuto nel 2010 nella regione di Assam.....	86
Figura 40. Evoluzione spazio-temporale della tau statistic per l'evento alluvionale id: 3987 avvenuto nel 2012 nella regione di Assam.	87
Figura 41. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3987 avvenuto nel 2012 nella regione di Assam.....	87
Figura 42. Localizzazione della regione di Meghalaya.	88
Figura 43. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Meghalaya.	89
Figura 44. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1413 avvenuto nel 1998 nella regione di Meghalaya.	90
Figura 45. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1413 avvenuto nel 1998 nella regione di Meghalaya.	90
Figura 46. Localizzazione della regione del Bengala Occidentale.	91
Figura 47. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione del Bengala Occidentale.	92
Figura 48. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1641 avvenuto nel 2000 nella regione del Bengala Occidentale.....	93

Figura 49. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale 1641 avvenuto nel 2000 nella regione del Bengala Occidentale.	93
Figura 50. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3539 avvenuto nel 2009 nella regione del Bengala Occidentale.....	95
Figura 51. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3539 avvenuto nel 2009 nella regione del Bengala Occidentale.	95
Figura 52. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3852 avvenuto nel 2011 nella regione del Bengala Occidentale.	96
Figura 53. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3852 avvenuto nel 2011 nella regione del Bengala Occidentale.....	97
Figura 54. Localizzazione dello Stato Gujarat.....	97
Figura 55. Localizzazione dell'evento alluvionale nella regione di Gujarat.....	98
Figura 56. Evoluzione spazio-temporale delle tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2680 avvenuto nel 2005 nella regione di Gujarat.....	99
Figura 57. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2680 avvenuto nel 2005 nella regione di Gujarat	100
Figura 58. Localizzazione della regione di Maharashtra.	100
Figura 59. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Maharashtra.	101
Figura 60. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2935 avvenuto nel 2006 nella regione di Maharashtra.....	102

Figura 61. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2935 avvenuto nel 2006 nella regione di Maharashtra.	102
Figura 62. Localizzazione della regione di Orissa.....	103
Figura 63. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Orissa.....	104
Figura 64. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1567 avvenuto nel 1999 nella regione di Orissa.....	105
Figura 65. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1567 avvenuto nel 1999 nella regione di Orissa.....	106
Figura 66. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1747 avvenuto nel 2001 nella regione di Orissa.....	107
Figura 67. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1747 avvenuto nel 2001 nella regione di Orissa.....	107
Figura 68. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3382 avvenuto nel 2008 nella regione di Orissa.....	108
Figura 69. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3382 avvenuto nel 2008 nella regione di Orissa.....	109
Figura 70. Localizzazione dello Stato Telangana.....	109
Figura 71. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Telangana.....	110
Figura 72. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1623 avvenuto nel 2000 nella regione di Telangana.....	111
Figura 73. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1623 avvenuto nel 2000 nella regione di Telangana.	112
Figura 74. Localizzazione dello Stato Andhra Pradesh.....	112

Figura 75. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Andhra Pradesh.	113
Figura 76. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1128 avvenuto nel 1996 nella regione di Andhra Pradesh.	115
Figura 77. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1128 avvenuto nel 1996 nella regione di Andhra Pradesh.....	115
Figura 78. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3551 avvenuto nel 2009 nella regione di Andhra Pradesh.	117
Figura 79. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3551 avvenuto nel 2009 nella regione di Andhra Pradesh.....	117
Figura 80. Localizzazione della regione di Tamil Nadu.....	118
Figura 81. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Tamil Nadu.....	118
Figura 82. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:694 avvenuto nel 1992 nella regione di Tamil Nadu.	120
Figura 83. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 694 avvenuto nel 1992 nella regione di Tamil Nadu.	120
Figura 84. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 4001 avvenuto nel 2012 nella regione di Tamil Nadu.	121
Figura 85. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 4001 avvenuto nel 2012 nella regione di Tamil Nadu.	122
Figura 86. Localizzazione della regione di Kerala.	122
Figura 87. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Kerala.	123

Figura 88. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2878 avvenuto nel 2006 nella regione di Kerala.....	124
Figura 89. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2878 avvenuto nel 2006 nella regione di Kerala.....	125
Figura 90. Regno Unito. Carta fisica e politica con localizzazione degli eventi alluvionali ..	128
Figura 91. Andamento densità di luminosità notturna totale in Regno Unito dal 1992 al 2013.	130
Figura 92. Regno Unito. Immagine satellitare con localizzazione dei centroidi delle aree allagate.....	132
Figura 93. Localizzazione del Paese Scozia.....	133
Figura 94. Localizzazione degli eventi alluvionali in Scozia.....	134
Figura 95. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2074 avvenuto nel 2002 in Scozia.....	135
Figura 96. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiali per l'evento alluvionale id: 2074 avvenuto nel 2002 in Scozia.	136
Figura 97. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2609 avvenuto nel 2005 in Scozia.....	137
Figura 98. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiali per l'evento alluvionale id: 2609 avvenuto nel 2005 in Scozia.	137
Figura 99. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2983 avvenuto nel 2006 in Scozia.....	138
Figura 100. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiali per l'evento alluvionale id: 2983 avvenuto nel 2006 in Scozia.	139
Figura 101. Localizzazione del Paese Irlanda del Nord.	139
Figura 102. Localizzazione degli eventi alluvionali in Irlanda del Nord.....	140

Figura 103. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3361 avvenuto nel 2008 in Irlanda del Nord.....	141
Figura 104. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3361 avvenuto nel 2008 in Irlanda del Nord.....	142
Figura 105. Localizzazione del Paese Inghilterra.....	142
Figura 106. Localizzazione degli eventi alluvionali in Inghilterra.	143
Figura 107. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1498 avvenuto nel 1999 nella regione di Yorkshire.....	145
Figura 108. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1498 avvenuto nel 1999 nella regione di Yorkshire.	145
Figura 109. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2673 avvenuto nel 2005 nella regione di Yorkshire.....	146
Figura 110. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2673 avvenuto nel 2005 nella regione di Yorkshire.	147
Figura 111. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3573 avvenuto nel 2009 nella regione di Yorkshire.....	148
Figura 112. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3573 avvenuto nel 2009 nella regione di Yorkshire.	149
Figura 113. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:677 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.	150
Figura 114. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 677 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.....	151
Figura 115. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:697 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.	152

Figura 116. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 697 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.....	153
Figura 117. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:1333 avvenuto nel 1998 nella regione delle Midlands.	154
Figura 118. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1333 avvenuto nel 1998 nella regione delle Midlands.....	155
Figura 119. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:1657 avvenuto nel 2000 nella regione delle Midlands.	156
Figura 120. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1657 avvenuto nel 2000 nella regione delle Midlands.....	156
Figura 121. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:3259 avvenuto nel 2008 nella regione delle Midlands.	158
Figura 122. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3259 avvenuto nel 2008 nella regione delle Midlands.....	158
Figura 123. . Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1816 avvenuto nel 2001 in Cornovaglia.....	159
Figura 124. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1816 avvenuto nel 2001 in Essex.	160
Figura 125. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2549 avvenuto nel 2004 in Cornovaglia.....	161

Figura 126. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2549 avvenuto nel 2004 in Cornovaglia....	162
Figura 127. Localizzazione del Paese Gales.	162
Figura 128. Localizzazione degli eventi alluvionali in Gales.	163
Figura 129. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2764 avvenuto nel 2005 in Gales.	164
Figura 130. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2764 avvenuto nel 2005 in Gales.	165

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Esempio di tabella estratta dal Dartmouth Flood Observatory.....	26
Tabella 2. Paesi con maggior numero di eventi alluvionali tra il 1992 ed il 2013.	31
Tabella 3. Paesi caratterizzati da una maggiore estensione delle aree alluvionate..	32
Tabella 4. Paesi caratterizzati da una durata maggiore degli eventi alluvionali.	32
Tabella 5. Paesi più densamente popolati.....	33
Tabella 6. Classifica dei paesi ad alto rischio alluvionale.....	35
Tabella 7. Classifica dei paesi ad alto rischio alluvionale che hanno presentato più di 5 eventi alluvionali nel periodo in esame.....	35
Tabella 8. Indicatori socioeconomici per i paesi che presentano alto rischio alluvionale.....	38
Tabella 9. Eventi alluvionali in India.	66
Tabella 10. Tabella degli eventi alluvionali in Regno Unito.....	127
Tabella 11. Andamento popolazione nel Regno Unito dal 2011 al 2017 e grafico per stime future	129

1. Introduzione

Tutti gli organismi viventi necessitano di acqua per la loro sopravvivenza, pertanto assicurarsene un adeguato approvvigionamento è essenziale per il benessere di qualsiasi essere umano, animale o vegetale. A differenza di altre risorse naturali, l'acqua circola naturalmente attraverso il cosiddetto ciclo idrologico: essa evapora dalla superficie terrestre ed entra in troposfera, si trasforma in stato liquido e ricade sulla Terra sotto forma di precipitazioni. La stabilità di questo processo, che consiste nella coesistenza di tutti gli stati termodinamici dell'acqua, permette al nostro pianeta di essere abitabile a differenza degli altri. Tuttavia, il riscaldamento globale che si verifica a causa dell'aumento delle emissioni di gas a effetto serra, coinvolge in larga parte gli oceani, incidendo sulla temperatura dell'acqua e sulla sua circolazione, oltreché sciogliendo le calotte polari. Date queste premesse, la domanda da porsi è come cambia il ciclo idrologico in condizioni climatiche mutevoli (European Environment Agency, 2019).

Dall'equazione di Clausius-Clapeyron sappiamo che la capacità di trattenere acqua in atmosfera aumenta del 7% per ogni incremento di temperatura di un grado celsius. Dato che la temperatura media oceanica è aumentata di circa 0,5°C dal 1970, si deduce una presenza di vapore in atmosfera del 4% in più rispetto al passato. Questi dati implicano che i fenomeni estremi (tempeste, cicloni, uragani, ...) agiscano sul nostro pianeta con potenze maggiori, producendo precipitazioni più intense e distruttive (Pelino, 2011).

Ad oggi, anche se le emissioni sono state rapidamente ridotte, ci si aspetta che entro il 2040 la temperatura si alzi di un ulteriore grado e mezzo, di due gradi entro il 2065 e di quattro gradi celsius entro il 2100 (Edenhofer, et al., 2014). Di pari passo con questi incrementi di temperatura, aumenterà anche il numero di vittime, sfollati e feriti causati da eventi estremi. Difatti, tra il 1998 ed il 2017 le catastrofi dovute al cambiamento climatico si stima abbiano ucciso 1,3 milioni di persone e ferito o lasciato senza casa né assistenza 4,4 miliardi di individui (Centre for Research and Epidemiology of Disaster, 2018). In questo periodo, su un totale di 7255 disastri

monitorati, il 91% include fenomeni correlati al clima e di questi il più frequente, con una percentuale pari al 43, è l'inondazione (figura 1).

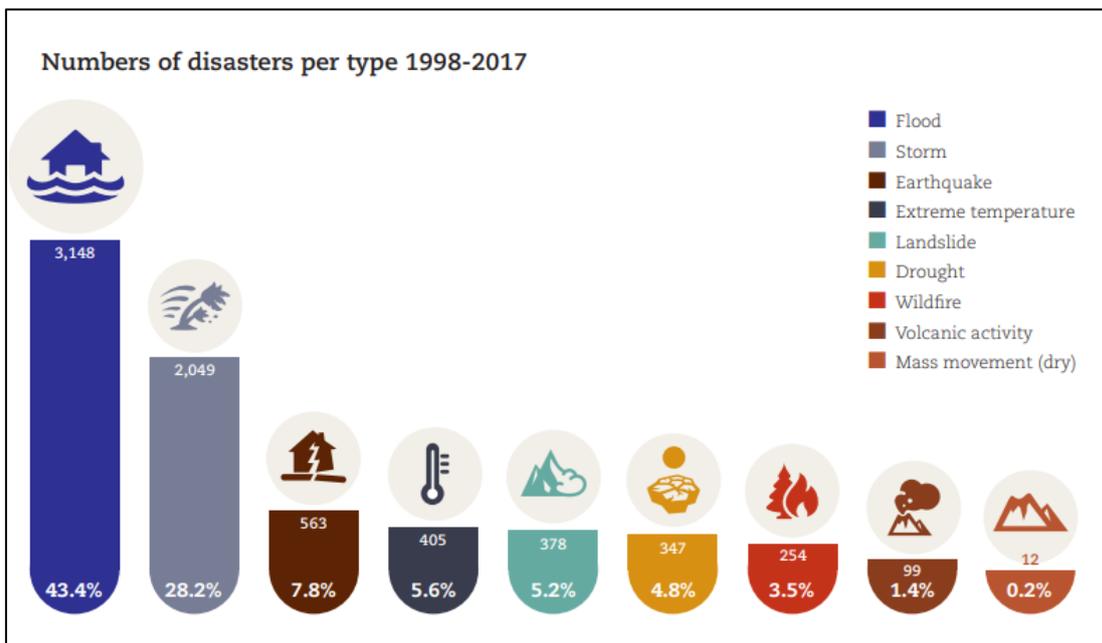


Figura 1. Disastri avvenuti nel periodo 1997-2017 divisi per tipologia.

Le piene inoltre, costituiscono il disastro naturale che affligge il maggior numero di individui nel mondo: circa 5,5 miliardi tra il 1980 ed il 2011, provocando perdite economiche dirette per oltre 90 miliardi di euro (Commissione Europea, 2019).

La natura e l'estensione di un'inondazione sono determinate dalla topografia, dal luogo geografico e dal grado di antropizzazione dell'area coinvolta. Le conseguenze sulle comunità umane, sono sia dirette, ovvero dovute all'esposizione diretta all'acqua, che indirette, in quanto la potenza del flusso distrugge l'ambiente circostante rendendolo invivibile. Oltre al cambiamento climatico, che non fa che aumentare i rischi di questo genere di disastri, la rapida e continua urbanizzazione tende a far sì che sempre più persone siano sottoposte ai vari rischi. Conoscere le cause di questi eventi e pianificare delle strategie di gestione, è alla base della mitigazione e del superamento di un'inondazione.

Un'alluvione può essere determinata da vari fattori:

- Precipitazione, neve, grandine con effetti sia immediati (flash flood) che a lungo termine;
- Aumento dei livelli idrici di fiumi e mari a causa di tsunami, scioglimento dei ghiacciai, o espansione delle masse marine;
- Fallimento del drenaggio naturale dovuto a mancato assorbimento dell'acqua, ad esempio in presenza di detriti non permeabili o di infrastrutture non assorbenti;
- Rilascio dell'acqua immagazzinata dovuto alla distruzione dei muri di trattenuta, frane, crollo di una diga.

La scala di severità di un'inondazione dipende oltre che dalla portata di acqua coinvolta, anche dalla geografia della zona in cui avviene, per esempio le comunità insediate a valle di una diga o in zone pianeggianti sono sicuramente quelle più a rischio. Ad alta quota, invece, nelle zone montane, le inondazioni sono rare e piuttosto brevi ma prevedono alti gradi di mortalità.

Gli impatti delle inondazioni, come già accennato, sono anche legati alla popolazione afflitta, sia in termini di densità della stessa, che in riferimento al grado di educazione, al reddito pro capite ed all'indice di sviluppo umano. Questo perché tutti questi elementi vanno di pari passo con la consapevolezza della comunità del pericolo che si corre vivendo nelle zone più vulnerabili, nonché con la capacità di prepararsi e gestire una potenziale evacuazione. I gruppi a maggior rischio includono anziani e bambini, che è probabile soffrano di traumi psicologici durante e dopo l'evento; disabili, carcerati ed indigenti, il cui isolamento e la cui mancanza di partecipazione alle decisioni collettive, ne intensifica la vulnerabilità. Infatti, nonostante le perdite economiche dovute ai disastri climatici siano maggiori nei paesi ad alto reddito, si stima che le persone colte da disastri naturali in paesi a medio-basso reddito, rischiano di morire sette volte di più che negli altri paesi. Il concetto di sviluppo economico non è da sottovalutare: la disponibilità finanziaria consente di costruire posti sicuri in cui rifugiarsi o di rendere disponibili infrastrutture sanitarie a valle di un evento. Inoltre, lo standard dei servizi, delle utilities e dei sistemi di drenaggio influenza la probabilità

di un collasso. Ad esempio, un design appropriato di una diga può essere decisivo nel caso dell'avvento di un fenomeno estremo, diminuendo il numero di morti e feriti coinvolti. Le società hanno cioè varie possibilità per affrontare l'alluvione: rinforzare le misure di protezione strutturale, introdurre sistemi di allarme, pianificare l'evacuazione con tecniche di gestione adeguate, adottare soluzioni edili a prova di inondazione o trasferirsi in aree più distanti da quelle allagate (Mard, et al., 2018). In particolare, quando un disastro coinvolge un paese già particolarmente vulnerabile, le ulteriori perdite economiche subite innescano un circolo vizioso, dal quale è difficile uscire, che conduce milioni di abitanti a lasciare i propri territori e a rifugiarsi altrove, in zone più o meno distanti da dove l'evento si è originato (Figura 2).

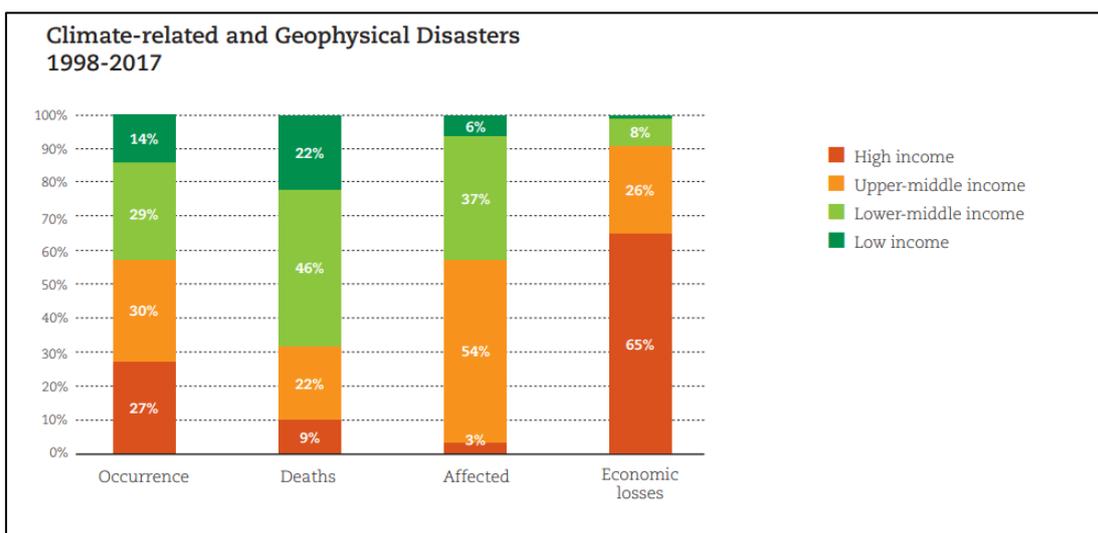


Figura 2. Influenza del reddito nei disastri correlati al clima.

Gli obiettivi di questo studio sono quelli di analizzare come gli eventi alluvionali possano incidere sugli spostamenti delle comunità che popolano le aree soggette al problema e di comprendere come questi flussi migratori si sviluppino nel corso del tempo e all'aumentare della distanza dalle zone coinvolte.

Lo spostamento delle popolazioni come risultato di cambiamenti ambientali è un fenomeno antico, a differenza del passato però la magnitudo degli impatti è così dirompente da sorprendere le comunità impreparate. Quando capita che tutti i

meccanismi di adattamento ad un ambiente vengano superati, l'unica scelta possibile resta quella di migrare in modo temporaneo o permanente in altri territori. Nel marzo 2012, gli scienziati dell'IPCC¹ fanno riferimento agli "spostamenti migratori" dovuti ad eventi estremi, asserendo che le inondazioni nella regione del delta del fiume Mekong, così come altri fenomeni estremi, siano associate a flussi migratori. Ad ogni modo, anche le migrazioni intese come conseguenza di un disastro ambientale, devono essere analizzate nel contesto di vulnerabilità, resilienza e adattabilità. In altre parole, vanno considerate le capacità di un singolo o di un gruppo di far fronte a condizioni avverse, la possibilità o meno di accedere al capitale umano, sociale, politico e finanziario e l'indole degli abitanti a adattarsi o meno a cambiamenti di vita (Gubbiotti & Finelli, 2012).

L'elaborato di tesi è organizzato come segue. Il Capitolo 2 descrive i dati utilizzati nello studio:

- Informazioni relative agli eventi alluvionali verificatisi nelle zone monitorate;
- Dati di luminosità artificiale notturna, utilizzati come indicatore di presenza antropica.

I dati relativi agli eventi alluvionali sono stati reperiti consultando il database globale Dartmouth Flood Observatory. I dati di luminosità notturna sono stati ottenuti da immagini satellitari raccolte ed elaborate dall'ente americano National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Il Capitolo 3 descrive la metodologia adottata per analizzare l'evoluzione spaziotemporale della popolazione in seguito ad eventi alluvionali. In particolare, India e Regno Unito costituiscono i due casi d'interesse del presente elaborato. Il Capitolo 4 riporta i risultati ottenuti, suddivisi per area di studio e infine nel Capitolo 5 sono riportati alcuni commenti conclusivi. L'elaborato è inoltre corredato da un'appendice che riporta i codici Matlab utilizzati per le analisi.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change.

2. Dati

Per lo studio effettuato sono state sfruttate due categorie di dati, riguardanti rispettivamente informazioni sugli eventi alluvionali e di popolazione.

2.1 Eventi alluvionali: Dartmouth Flood Observatory

Lo studio preliminare ha avuto origine da un database open source redatto dal *Dartmouth Flood Observatory*² (G.R.Brakenridge, 2019). Si tratta di un archivio che contiene informazioni specifiche sulle piene avvenute in ciascun paese del mondo dal 1985 ad oggi. Le statistiche presentate nella lista redatta dall'Osservatorio, sono derivate da notizie governative e di telerilevamento; la copertura e le informazioni presenti per ogni singolo evento variano da nazione a nazione e la rapidità di reperimento dei dati dipende dal livello di sviluppo tecnologico del paese in cui avviene l'inondazione. Per ogni evento figurano i seguenti campi (tabella 1):

- ID, codice identificativo della piena
- Paese di origine ed eventuali altri paesi coinvolti dall'evento alluvionale
- Latitudine e longitudine del centroide dell'area alluvionale
- Area alluvionata
- Data di inizio e termine dell'evento
- Numero di vittime causate dal disastro
- Causa principale (pioggia intensa, scioglimento di ghiacciai, cicloni tropicali, pioggia torrenziale o monsonica, tsunami, picchi di marea)
- Grado di severità (S) della piena:

² <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>.

- Classe 1: grandi eventi di piena con danni rilevanti a strutture ed agricoltura, con tempi di ritorno di dieci o vent'anni;
- Classe 1,5: eventi di piena molto estesi, con tempi di ritorno compresi tra venti e cento anni;
- Classe 2: eventi estremi, con tempi di ritorno stimati maggiori a cento anni.

ID	COUNTRY	LONG	LAT	AREA	BEGAN	ENDED	SEVERITY
2008	Afghanistan	65,9365	36,3468	3345,25	28/07/2002	30/07	2
2210	Afghanistan	65,0691	33,069	14987,88	18/04/2003	21/04	2
2300	Afghanistan	70,588	35,8421	2576,57	29/07/2003	30/07	2
3479	Afghanistan	64,3991	34,88	58894,07	03/05/2009	10/05	2
624	Argentina	-64,546	27,5982	192706	11/02/1992	14/02	2
638	Argentina	55,9395	28,4099	1347810	01/04/1992	02/07	2
942	Argentina	-60,068	37,1326	303423,6	06/04/1995	11/04	2
1334	Argentina	60,1238	25,0627	541026,7	14/04/1998	10/05	2
687	Australia	138,966	34,8687	12878,07	30/08/1992	30/08	2
786	Australia	146,608	36,6559	4163,54	03/10/1993	15/10	2
938	Australia	117,538	-26,821	990198,3	05/03/1995	13/03	2
1068	Australia	149,128	-27,195	330398	02/05/1996	09/05	2
1300	Australia	131,849	-14,556	267569,3	25/01/1998	28/01	2

Tabella 1. Esempio di tabella estratta dal Dartmouth Flood Observatory.

2.2 Popolazione: luminosità notturna artificiale

I dati di popolazione sono invece ottenuti da dati di luminosità notturna: Chris Elvidge, uno scienziato del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), afferma che *“nulla può dirci di più sulla diffusione degli umani sulla Terra che le luci della città”*.

William Stefanov, del programma della Stazione Spaziale internazionale, è dello stesso avviso, asserendo che le luci della città forniscano un mezzo semplice ed immediato per mappare le aree urbane e mostrare l'esatta localizzazione dei principali centri abitati.

Nell'Ottobre del 2011 viene lanciato dalla NASA, da NOAA e dal Dipartimento della Difesa, il satellite Suomi National Polar-orbiting Partnership che consente di distinguere le luci notturne con livelli di risoluzione spaziale superiori di sei volte e di risoluzione luminosa di duecentocinquanta volte maggiori rispetto al passato. A livello pratico Suomi è in grado di osservare ed analizzare le luminosità fino alla scala di una lampadina isolata su un'autostrada o di un peschereccio e l'applicazione di maggior interesse è di certo lo studio delle luci della città. Esse forniscono un mezzo semplice per mappare le aree urbane e rurali, mostrando i luoghi dove si concentrano i maggiori centri abitati, tenendo traccia negli anni della crescita urbana e suburbana. I demografi hanno sfruttato lo studio per modellare lo sviluppo delle attività economiche, gli astronomi per selezionare siti papabili per osservatori, i gruppi ambientalisti per monitorare lo sviluppo attorno a parchi e rifugi faunistici, le compagnie elettriche per gestire le emergenze blackout o per modellare la distribuzione delle emissioni di anidride carbonica da combustibili fossili. Dunque, gli scienziati hanno rilasciato nuove mappe globali della Terra di notte, fornendo visioni sugli insediamenti umani in tutto il nostro pianeta (Carlowicz, 2012).

Le immagini satellitari sono fornite dal Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) – Operational Linescan System (OLS) e sono accessibili dal NOAA National Geophysical Data Center (2013). I dati coprono un periodo che va dal 1992 al 2013 e vengono utilizzati in tutto sei satelliti; nel caso di alcuni anni coesistono dati provenienti da una coppia di satelliti, perciò i dati verranno mediati.

I dati di luminosità (figura 3), da cui vengono esclusi dati di luce solare, lunare e fenomeni effimeri³, sono distribuiti come immagini raster geolocalizzate (GeoTiff), presentano una risoluzione spaziale di 30 secondi d'arco, corrispondenti circa a 1 km all'equatore. I dati di luminosità notturna sono espressi con valori tra 0 e 63 per ciascun pixel, dove lo zero rappresenta buio completo e 63 aree a spiccata luminosità (Ceola & Montanari, 2014).

³ Ad esempio incendi o gas flares.

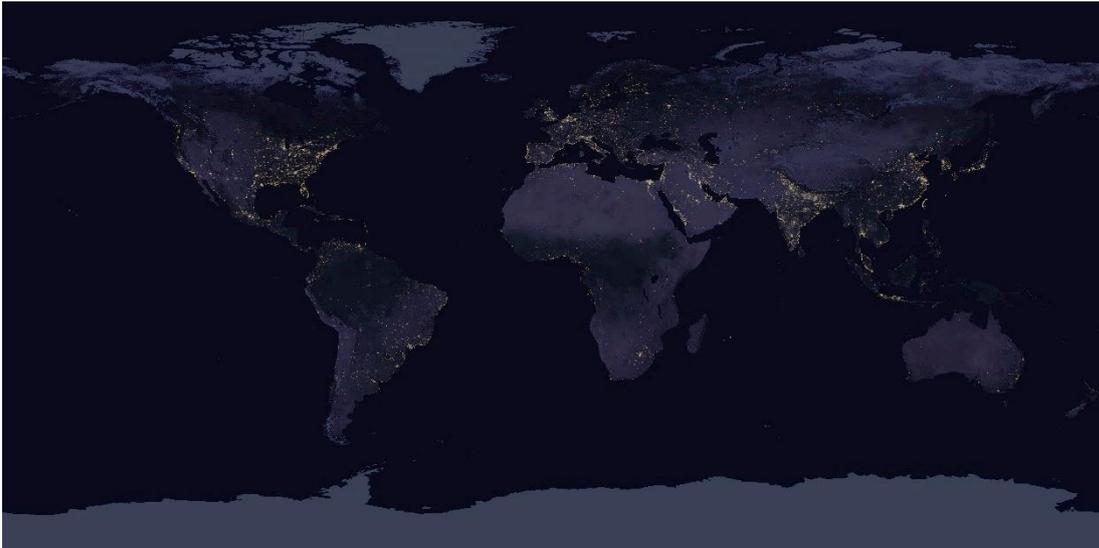


Figura 3. Immagine esemplificativa di dati di luminosità notturna artificiale.

Questi dati saranno fondamentali per le statistiche che si realizzeranno nell'ambito di QGIS, perché saranno utilizzati come indicatori dei valori di densità di popolazione nelle aree investigate.

3. Metodologia

In questo capitolo sono spiegate dettagliatamente tutte le analisi operative effettuate per giungere ai risultati finali, che saranno conseguentemente analizzati nel capitolo seguente.

3.1 Criteri per l'identificazione di nazioni ad alto rischio alluvionale

Ai fini del presente elaborato di tesi, il primo passo è stato quello di selezionare degli Stati che fossero significativi in termini di rischio alluvionale. Dunque, dalla lista resa disponibile dal Dartmouth Flood Observatory (G.R.Brakenridge, 2019), è stato possibile creare un archivio filtrato basato sui seguenti requisiti: eventi di piena di severità pari a 2 e compresi tra gli anni 1992 e 2013⁴.

Per stilare una classifica dei paesi di maggior interesse, si è tenuto conto di coefficienti basati su quattro caratteristiche rese note dal database:

- Numerosità di eventi alluvionali in ciascuno Stato;
- Somma delle estensioni delle aree alluvionate in rapporto all'area totale dello Stato;
- Durata delle piene;
- Densità di popolazione coinvolta.

Ciascun indicatore è stato poi interpretato seguendo la teoria della *Weibull Plotting Position*: si tratta di assegnare una famiglia di distribuzione ad un set di dati, in modo da determinare una funzione di frequenza cumulata. A ciascun coefficiente si assegna una frequenza relativa (F_i) che nel nostro caso è quella definita da Weibull,

⁴ L'arco temporale è stato imposto dai dati di luminosità notturna artificiale, che per il momento sono disponibili solo dal 1992 al 2013.

caratterizzata da un'indipendenza dalla distribuzione (*distribution free*) e definita come segue:

$$F_i = \frac{i}{N + 1} \quad (1)$$

con N , numero di eventi totali ed i , posizione assunta dai singoli coefficienti considerati in ordine crescente e compresa tra 1 ed N .

3.1.1 Numerosità di eventi alluvionali

Un aspetto rilevante per la scelta è sicuramente il numero di alluvioni che, nell'arco di tempo considerato, ha coinvolto i singoli Stati, esso infatti può essere un indicatore del rischio alluvionale. Inoltre, disporre di un numero sufficiente di eventi è anche una prerogativa rilevante affinché l'analisi risulti affidabile in termini di significatività. Costruendo un istogramma in cui compaiano i vari Stati in base al numero di piene in essi verificatesi, si ottiene il seguente risultato (figura 4):

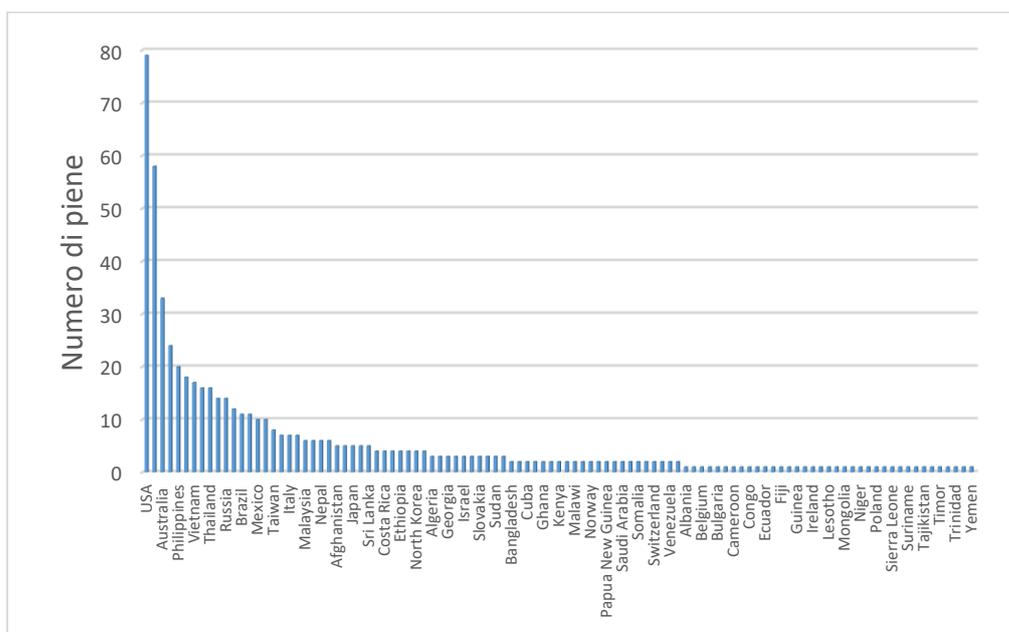


Figura 4. Paesi ordinati per numero di piene nel periodo 1992-2013, secondo l'archivio del Dartmouth Flood Observatory.

Questo indicatore, per essere più rappresentativo, va normalizzato in base all'estensione totale di ciascun paese, in modo da avere un'idea concreta su quale paese sia il più soggetto ad inondazioni⁵. Se ne ricava la seguente classifica provvisoria:

Paesi	Coefficiente cardinalità piene
Samoa Americana	0,991
Taiwan	0,981
Trinidad	0,972
Israele	0,962
El Salvador	0,953

Tabella 2. Paesi con maggior numero di eventi alluvionali tra il 1992 ed il 2013.

La Samoa Americana risulta al primo posto nonostante sia stata interessata da un solo evento di piena perché si estende su un territorio di soli 2944 km² (Samoa Americane, s.d.). L'ultima posizione è occupata dalla Siberia: essa è stata invasa da una sola piena tra il 1992 ed il 2013, come la Samoa Americana, ma viene ridistribuita su un territorio di 13 milioni di km².

3.1.2 Estensione delle aree alluvionate

Come secondo coefficiente si è considerata l'area inondata da ciascuna piena, indice dell'entità dell'evento stesso, anche stavolta normalizzata in base alla superficie totale della regione coinvolta. La classifica ottenuta viene poi scalata, come nel caso precedente, in base alla *Weibull Plotting Position*. I paesi che figurano ai primi posti della graduatoria sono quelli che presentano superfici totali poco estese ma vaste aree inondate.

⁵ Ad esempio, negli USA vi sono 79 eventi, ma distribuiti su un territorio molto vasto; in Taiwan invece si contano solo 8 piene ma incluse in un territorio meno esteso, il che rende il paese più vulnerabile a questo tipo di avvenimenti.

Paesi	coefficiente estensione piena
Samoa Americana	0,991
El Salvador	0,981
Guinea	0,972
Bangladesh	0,962
Filippine	0,953

Tabella 3. Paesi caratterizzati da una maggiore estensione delle aree alluvionate.

3.1.3 Durata degli eventi alluvionali

Nel database del Dartmouth Flood Observatory è presente un campo che indica la durata (in giorni) di ciascun evento: il range varia tra zero (ossia qualche ora) e 418 giorni, il che presuppone che i vari avvenimenti portino a conseguenze sostanzialmente differenti tra loro. Va specificato che, nel calcolo della Weibull Position, ad eventi con stessa durata è stato attribuito il medesimo valore.

Il risultato è il seguente:

Paese	Coefficiente Durata
USA	0,986
China	0,971
Thailandia	0,957
India	0,942
Australia	0,928

Tabella 4. Paesi caratterizzati da una durata maggiore degli eventi alluvionali.

Questa volta in vetta alle classifiche abbiamo paesi protagonisti di un numero significativo di inondazioni, poiché anch'esso contribuisce al raggiungimento di un alto valore di durata degli eventi.

3.1.4 Densità di popolazione

Infine, è stata considerata la densità di popolazione di ciascun paese (Barrientos & Soria, 2018), in quanto un maggior numero di persone in pericolo di fronte ad un

evento estremo, aumenta la vulnerabilità del paese ed i rischi legati ad un potenziale evento di piena. I risultati per i primi cinque paesi sono i seguenti:

Paese	Coefficiente popolazione
Bangladesh	0,987179487
Taiwan	0,974358974
South Korea	0,961538462
Israel	0,948717949
India	0,935897436

Tabella 5. Paesi più densamente popolati.

L'analisi seguente ha poi consentito di aggregare tutti gli indicatori per ottenere un indice aggregato finale che tenga conto di ognuno di essi e sulla base del quale fare le dovute considerazioni.

I coefficienti parziali sono stati sommati tra loro attribuendo ad ognuno il peso di un quarto per ottenere l'indice di rischio di ciascun paese. Esso ha permesso di confrontare direttamente i vari stati, in modo da selezionarne due. La selezione ha preso in considerazione un paese in via di sviluppo ed un paese economicamente sviluppato. Tenendo conto dell'indice finale ottenuto dalla sommatoria dei coefficienti parziali, è stato quindi possibile redigere una mappa mondiale del rischio alluvionale. La legenda è assegnata per colore:

- Rischio alto (in rosso): valori di rischio maggiori di 0,53
- Rischio medio (in arancione): valori di rischio tra 0,4 e 0,53
- Rischio moderato (in giallo): valori di rischio tra 0,3 e 0,4
- Rischio basso (in verde): valori di rischio minori di 0,3.

3.1.5 Risultati finali

Nell'immagine sottostante (figura 5), si evidenzia quindi quali siano i paesi nel mondo che, in base agli indicatori proposti, presentano il maggior rischio.

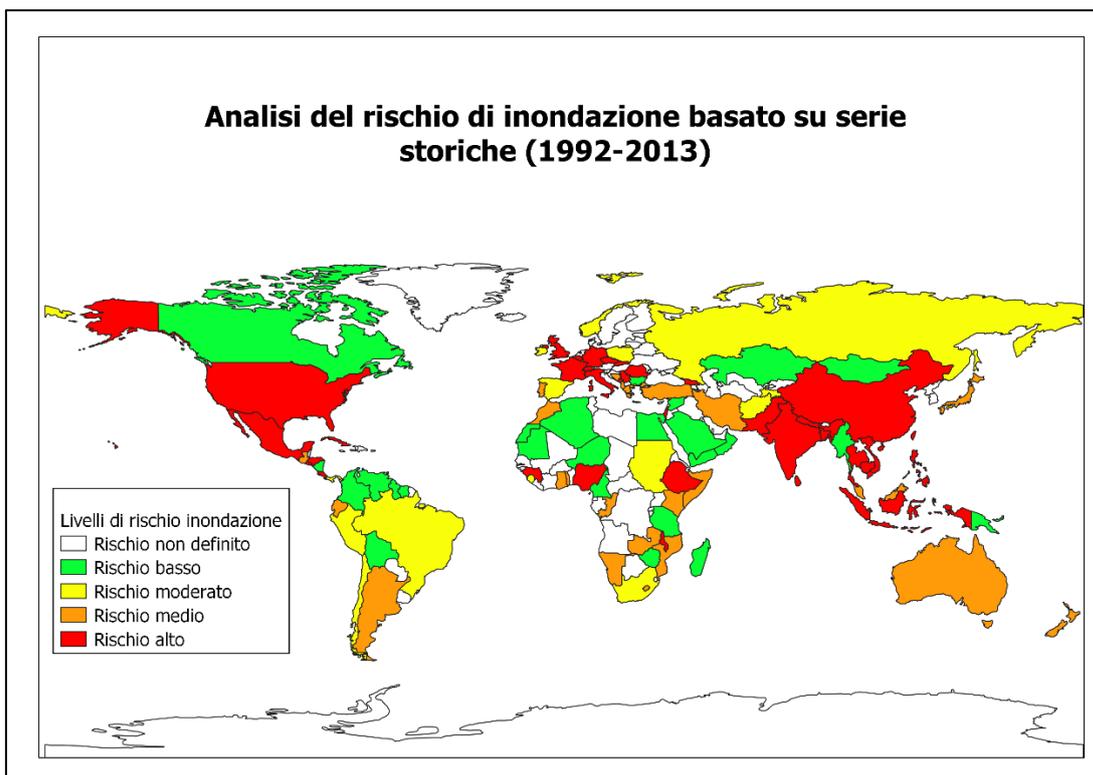


Figura 5. Livelli di rischio di inondazione stimati a partire da quattro indicatori: numero di piene, estensione di piene, durata di piene e densità di popolazione.

Di seguito viene presentata una classifica dei paesi in ordine di rischio decrescente (tabella 6).

Paese	FINALE
Filippine	0,9128
Bangladesh	0,8521
Vietnam	0,8455
Thailandia	0,8312
Romania	0,8140
Regno Unito	0,8037
India	0,7832
Taiwan	0,7821
Nepal	0,7801
Sri Lanka	0,7693
Corea del Nord	0,7533
Repubblica Ceca	0,7525
El Salvador	0,7522
Pakistan	0,7438

Cambogia	0,7300
Cina	0,7226
Germania	0,7213
Slovacchia	0,7150
Israele	0,7088
Samoa Americana	0,7072
Francia	0,6987
Malawi	0,6926
Svizzera	0,6533
Guinea	0,6499
Nigeria	0,6481
Costa Rica	0,6475
Italia	0,5989
Honduras	0,5953
Belgio	0,5907
Georgia	0,5883
Cuba	0,5856
Serbia-Montenegro	0,5765
USA	0,5728
Messico	0,5697
Trinidad	0,5687
Etiopia	0,5615
Indonesia	0,5349

Tabella 6. Classifica dei paesi ad alto rischio alluvionale.

Il passo successivo è stato quello di eseguire un filtro per eliminare i paesi che contino un numero di eventi inferiore a cinque, questo perché lo studio necessita di un numero significativo di dati a disposizione.

Il risultato ottenuto è il seguente (tabella 7):

Paese	FINALE
Filippine	0,913
Thailandia	0,845
Romania	0,831
Regno Unito	0,814
India	0,804

Tabella 7. Classifica dei paesi ad alto rischio alluvionale che hanno presentato più di 5 eventi alluvionali nel periodo in esame.

Di questi paesi se ne vogliono selezionare due, uno in via di sviluppo ed uno già economicamente sviluppato, affinché si possano fare delle considerazioni su quanto questa caratteristica incida sugli spostamenti della popolazione.

3.1.6 Strumenti socio-economici

Per distinguere le potenzialità socio-economiche dei vari paesi, sono stati sfruttati quattro indici differenti:

- *ISU: indice di sviluppo umano*, pubblicato ogni anno dal 1990 nell'ambito del Rapporto sullo Sviluppo Umano dal Programma delle Nazioni Unite per lo Sviluppo. Si tratta di una misura sintetica (tra 0 e 1) che riassume gli standard di ciascun paese sulla base di tre fattori principali a cui è attribuito uno stesso peso:
 - la possibilità di condurre una vita lunga e sana, misurata tramite la speranza di vita alla nascita;
 - il livello di istruzione, considerato come media di anni trascorsi o in progetto di trascorrere a scuola
 - lo standard di vita, calcolato su una stima del Pil medio pro capite (Pisani, 2017).

- *World Bank Classification*, una divisione delle economie mondiali in quattro macro-gruppi di reddito stabiliti dalla Banca Mondiale. La misura del reddito è effettuata tenendo conto del reddito nazionale lordo pro capite in dollari statunitensi e poi convertito utilizzando il metodo Atlas della Banca Mondiale. Nel 2019 le classi sono così definite (Prydz & Wadhwa, 2019):
 - Reddito basso < 1025 dollari
 - Reddito medio-basso, tra 1026 e 3995 dollari
 - Reddito medio-alto, tra 3996 e 12375 dollari

- Reddito alto > 12375 dollari.
- *PVI, Poverty Vulnerability Index*, si tratta di un indice pensato per costruire delle categorie di vulnerabilità alla povertà assumendo che quelle più vulnerabili siano quelle che faranno più fatica a riprendersi da un potenziale disastro. Questo perché gli abitanti saranno incapaci di contribuire alla ricostruzione e di conseguenza avranno necessità di maggiori risorse per ripartire. La misura è eseguita in relazione alla percentuale di abitanti di ciascun paese costretta a vivere quotidianamente con introiti al di sotto di una certa soglia. Le categorie sono così divise (Shepherd, et al., 2013):
 - *Highest vulnerability*, più del 10% della popolazione vive con meno di \$0,75 al giorno
 - *High vulnerability*, più di un milione di abitanti vive con meno di \$0,75/day
 - *Moderate vulnerability*, più del 10% (almeno un milione di abitanti) vive con minimo \$1,25
 - *Lower vulnerability*, più del 10% degli abitanti (almeno un milione) con meno di \$2,00/day
 - *Lowest vulnerability*, più del 10% (almeno un milione di abitanti) con meno di \$4,00/day
 - *Not vulnerable* meno del 10% vive con \$4,00/day (e meno di un milione)
- *MHI: Multi-hazard Indicator*, si tratta di un indicatore che assegna ad ogni evento naturale estremo un grado di rischio da uno a sette. Gli eventi considerati sono cinque:
 - Inondazioni, calcolate in base all'avvento di precipitazioni su una data area
 - Cicloni tropicali, misurati in base ai venti e alle precipitazioni

- Terremoti, monitorati mediante il *Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)*. Il rischio di una specifica zona, in tal caso, viene considerato invariato nel tempo.
- Siccità, intesa in senso meteorologico e cioè come risultato dovuto ad assenza di precipitazioni
- Temperature estreme, calcolate sulla base del percentile al 95 della massima temperatura giornaliera

Per ciascun rischio naturale si considera il valore più alto che si manifesta all'interno della regione e la somma dei cinque indicatori singoli restituisce l'MHI. Chiaramente con l'aumento della superficie ricoperta da uno stesso paese, aumenta anche la probabilità di trovarsi di fronte ad aree potenzialmente ad alto rischio. Le aree più preoccupanti sono quelle dell'Asia Meridionale e dell'Africa sub-sahariana (Shepherd, et al., 2013).

I dati di cui sopra e relativi ai paesi più interessanti sono di seguito riassunti; tra questi sono stati scelti due paesi con indici sensibilmente diversi e col più alto numero di piene possibili, per rendere l'analisi più significativa.

Paese	ISU	World bank classification	PVI	MHI 2000
Filippine	medio	lower middle income	high vulnerability	33
Vietnam	medio	lower middle income	moderate vulnerability	34
Thailandia	Alto	upper-middle income	moderate vulnerability	34
Romania	molto alto	upper middle income	not vulnerable	32
Regno Unito	molto alto	high income	not vulnerable	<25 ⁶
India	medio	lower middle income	high vulnerability	35

Tabella 8. Indicatori socioeconomici per i paesi che presentano alto rischio alluvionale.

Le Filippine, il Vietnam e l'India presentano un ISU medio, alta o moderata vulnerabilità alla povertà e reddito della popolazione basso; tra i tre paesi però, il Vietnam è quello con il PVI meno rilevante, perciò viene escluso. L'India, inoltre, è

⁶ Per la fonte utilizzata (Shepherd, et al., 2013), il valore di cut-off è 25 perché sono stati campionati solo i paesi ragionevolmente più a rischio.

quella maggiormente sottoposta a pericolosità nel caso sopraggiungano eventi estremi naturali (MHI=35) e, in tal caso, il numero di piene disponibili è maggiore che nel caso delle Filippine (quest'ultima è stata protagonista di 20 eventi contro i 24 dell'India).

La Romania ed il Regno Unito sono caratterizzati da un alto indice di sviluppo umano, non sono considerate zone vulnerabili alla povertà ed il reddito medio è giudicato rispettivamente medio-alto e alto secondo la classificazione sviluppata dalla Banca Mondiale. L'ideale sarebbe considerare un paese con un alto MHI (Romania col valore di 32); per contro il numero di piene avvenute dal 1992 al 2013 è minore che nel caso del Regno Unito. Inoltre, nel 2011 il governo inglese ha riconosciuto il rischio inondazione come una delle minacce più serie che il paese dovrà fronteggiare ed i finanziamenti per la gestione di questi rischi sono garantiti solo fino al 2021 (Royal Geographic Society, 2011). Dunque, può essere interessante indagare come la popolazione ha reagito ad eventi di piena e di conseguenza determinare una strategia che consenta una gestione sostenibile di questi problemi. I due paesi da analizzare saranno dunque India e Regno Unito. Dal database a disposizione del *Dartmouth Flood Observatory* figurano 24 eventi per l'India e 18 per il Regno Unito. Per ognuno di essi sarà effettuata un'analisi di spostamento della popolazione, mediante tecniche di clustering spazio-temporale.

3.2 *Analisi statistica di cluster spazio-temporali*

In statistica il clustering o analisi dei gruppi è un insieme di tecniche di analisi multivariata dei dati, volte alla selezione e a raggruppamenti di elementi omogenei in un insieme. In genere queste misure si dividono in:

- Locali o di primo ordine, se si riferiscono ad un evento che accade in un particolare punto dello spazio;
- Globali o di secondo ordine, se sono misure che si effettuano in ambiti spaziali più vasti.

Il clustering spaziale viene spesso sfruttato in epidemiologia per la scrittura di mappe di rischio o per identificare i luoghi di sviluppo di alcune malattie. La localizzazione nello spazio di un individuo infetto definisce il seme da cui inizia la trasmissione del morbo. Il conseguente sviluppo della malattia seguirà una forma che dipende dal comportamento dell'ospite, dal metodo di trasmissione della malattia e dall'ambiente circostante. Nel caso dell'influenza, ad esempio, il movimento del soggetto ospitante è il primo fattore a determinare lo sviluppo spaziale del morbo perché esso si trasmette direttamente da individuo a individuo (Lessler, et al., 2016).

Esistono vari tipi di misure globali di clustering, esse possono riferirsi o alle esatte posizioni dei punti, o ad un insieme di punti, aggregati all'interno di celle. In quest'ultimo approccio, per prima cosa si posiziona una griglia sopra l'area studiata e poi si conta il numero di punti che ricade all'interno di ciascuna cella della griglia. Questa soluzione può essere utile per determinare se le celle con un elevato numero di punti tendono a presentarsi le une vicine alle altre e pertanto è molto sensibile alle dimensioni della singola cella; tuttavia non fornisce informazioni sulla distribuzione dei singoli punti. Un approccio alternativo è quello di calcolare la distanza media tra ciascun punto ed il punto ad esso più vicino. In tal caso non è richiesta l'operazione di aggregazione dei punti, perciò si evita la perdita di informazioni.

Un'altra soluzione basata sulla distanza è quella della funzione K (Lessler, et al., 2016) e sfrutta le stime del numero atteso di punti entro un certo range di distanze:

$$k(d) = \lambda^{-1}E[N(d)] \quad (2)$$

dove λ^{-1} rappresenta l'inverso della densità spaziale dei punti presenti all'interno dell'area di studio (in genere calcolata dividendo l'estensione dell'area per il numero di punti presenti all'interno di essa); $E[N(d)]$ è il numero atteso dei punti a distanza d da un punto. Il valore di $k(d)$ in un processo omogeneo di Poisson⁷ coincide con πd^2 . Questo tipo di misura si rivela spesso complessa da interpretare e spesso si limita solo a definire se ci sia o meno dipendenza spaziale a varie scale spaziali. Le soluzioni finora proposte però non rispondono ai criteri fondamentali che una misura epidemiologica dovrebbe rispettare: permettere l'interpretazione in termini di "rischio" di malattia e la comparazione tra le posizioni dei vari punti e distinguere la variazione spaziale che si manifesta durante il processo di trasformazione.

Nel tentativo di trovare un approccio che soddisfacesse i requisiti di cui sopra, è stata proposta la funzione tau-statistic. Si tratta di una funzione che misura il rischio relativo di ciascun individuo ad una specifica distanza da un caso infetto, rispetto al rischio di un qualunque individuo facente parte di quella popolazione. In altre parole, è intesa come il rapporto tra il tasso di incidenza di qualcuno λ , ad un range di distanza $(d1,d2)$, e il tasso medio di incidenza sull'intera popolazione, così come definito dalla seguente equazione (Lessler, et al., 2016).

$$\tau(d1, d2) = \frac{\lambda(d1, d2)}{\lambda} \quad (3)$$

⁷ Processo stocastico che simula il manifestarsi di eventi indipendenti continuamente nel tempo. Inoltre, il numero di eventi che avviene tra due istanti a e b segue una distribuzione di Poisson.

Un esempio specifico in cui è stata utilizzata questa espressione è l'analisi delle epidemie di colera in Africa Sub-sahariana che sono causa di alte percentuali di mortalità globale e provocano situazioni disagiate in nazioni già economicamente e socialmente fragili. Lo studio è stato effettuato stimando il rischio che si presenti un nuovo caso di colera, dopo un caso sospettato come "primario", ad una distanza d dal primo, entro t giorni ed all'interno di una struttura sanitaria, rispetto al rischio che il caso si verifichi ovunque nella popolazione (cioè in qualsiasi punto della città) durante lo stesso periodo. I valori di tau-statistic sono stati studiati all'interno di una finestra spaziale a partire da una distanza di 50 metri, che avanza ogni 10 metri per altri 50 metri. Caratterizzando la distribuzione spazio-temporale su piccola scala dei casi di colera si possono fornire nuove ed utili intuizioni sull'azione dei meccanismi di trasmissione. Questi dati potrebbero poi essere decisivi nella programmazione di un percorso mirato al controllo dell'epidemia (Azman, et al., 2018).

3.2.1 Applicazione della tau statistic per analizzare l'evoluzione spazio-temporale della popolazione in seguito ad eventi alluvionali

Nel presente elaborato di tesi si vuole applicare questa metodologia per lo studio delle piene avvenute tra il 1992 ed il 2013 in India e in Regno Unito, che hanno mostrato una severità elevata (2 su 2) secondo il Dartmouth Flood Observatory. Per prima cosa si vogliono rielaborare i dati di luminosità per renderli paragonabili alla densità di popolazione presente all'interno di ciascun buffer. Per farlo si divide le somme di luminosità (ΣNL) raccolte all'interno di ciascun buffer, per la superficie (A) ricoperta dalle singole aree ed eseguiamo la stessa operazione per i dati raccolti sull'intera nazione, dividendoli stavolta per la superficie totale del Paese di riferimento. La densità di luminosità notturna (o valore medio di luminosità) all'interno del buffer avente dimensione $d1, d2$, risulterà così definita:

$$nl(d1, d2) = \frac{\Sigma NL(d1, d2)}{A(d1, d2)} \quad (4)$$

Nel diagramma a blocchi seguente (figura 6) sono riassunti i passaggi necessari a rendere i dati adatti al calcolo della tau-statistic.

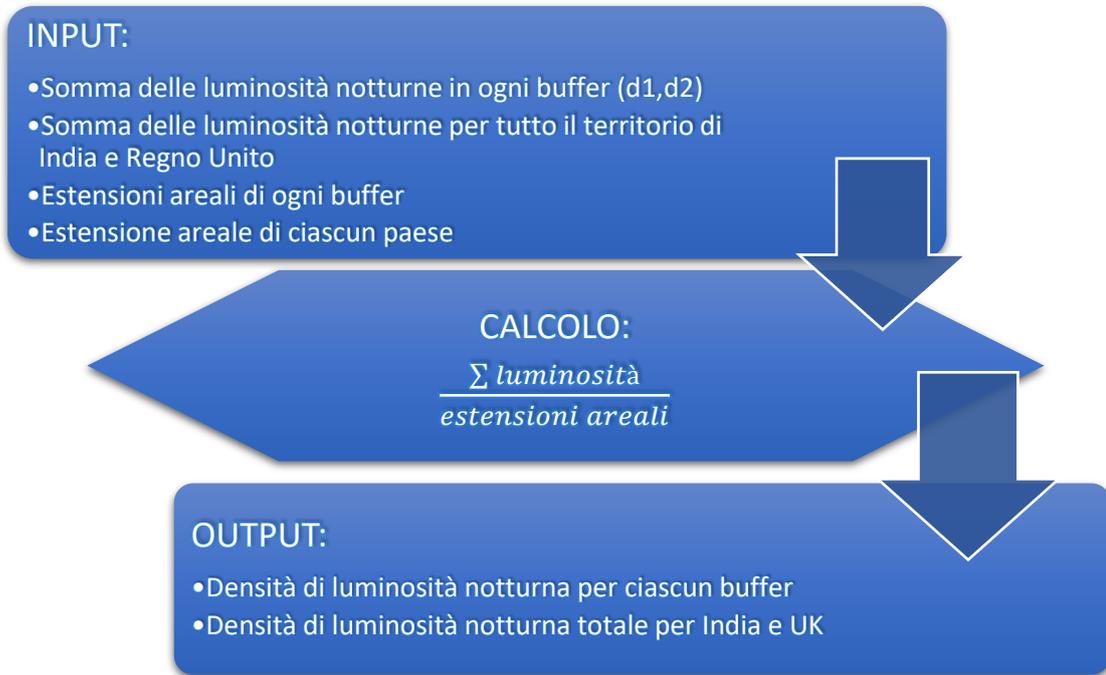


Figura 6. Diagramma a blocchi che sintetizza il calcolo delle densità di luminosità notturna artificiale locale e totale.

Può essere significativo per l'analisi finale plottare i dati di densità in una serie di grafici, in cui sia visibile sia l'andamento di essi nel periodo di tempo analizzato ed in cui sia evidente l'anno in cui si è abbattuta la piena (figura 7). In tal modo si può comprendere con più facilità quale sia stato il comportamento della popolazione al sopraggiungere dell'evento estremo.

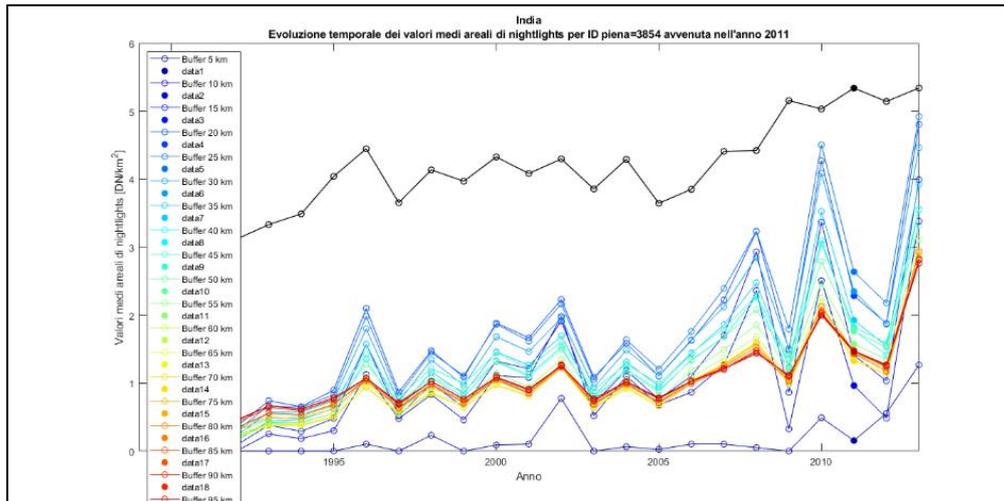


Figura 7. Esempio di evoluzione temporale dei valori medi areali di NTL per la piena 3854.

Dopo aver provveduto alla realizzazione dei grafici che illustrano l'evoluzione spatio-temporale della luminosità notturna media nel periodo 1992-2013, sarà possibile interpretare come la popolazione si è comportata in seguito all'evento alluvionale. In particolare, oltre ai momenti successivi, si osserva anche la situazione antecedente e durante l'inondazione: questi dati possono fornire un'idea sulla reazione della popolazione rispetto alla catastrofe, sia a breve che a lungo termine.

La tau-statistic applicata per analizzare l'evoluzione spatio-temporale della popolazione in seguito ad un evento alluvionale è definita come segue:

$$\tau(0; d) = \frac{nl_{anno\ i}(0; d) - nl_{anno\ piena}(0; d)}{nl_{anno\ i}(stato) - nl_{anno\ piena}(stato)} \quad (5)$$

dove d è la distanza dal baricentro dell'alluvione. Dunque:

- $nl_{anno\ i}(0; d)$ indica la densità di luminosità notturna artificiale dell'anno in esame e nel territorio in esame (in un'area circolare di raggio d a partire dal centroide);

- $nl_{anno\ piena}(0; d)$ è la densità di luminosità notturna artificiale riferita all'area di cui sopra, ma nell'anno in cui si verifica l'evento alluvionale;
- $nl_{anno\ i}(stato)$ è la densità di luminosità notturna artificiale nell'intero stato e nell'anno in esame;
- $nl_{anno\ piena}(stato)$ è la densità di luminosità notturna artificiale nell'intero stato nell'anno in cui si verifica l'evento alluvionale.

Quindi, al numeratore avremo la differenza tra la densità di luminosità notturna relativa all'anno in esame e quella relativa all'anno di avvento della piena, entro una certa distanza spaziale definita dal buffer. Al denominatore, invece, comparirà la differenza di luminosità applicata gli stessi anni ma considerando le luci totali del paese.

3.3 *Analisi in QGIS*

I dati disponibili dal Dartmouth Flood Observatory sono stati implementati in un software GIS per poter analizzare come la popolazione si è spostata in funzione degli eventi di piena verificatisi. Una volta localizzati gli eventi sul territorio, si è provveduto a costruire delle aree di buffer attorno al centroide di ciascuna inondazione (le cui coordinate sono fornite dall'archivio di Dartmouth). Grazie a tali aree sono state effettuate delle statistiche su dei raster geolocalizzati e con pixel provvisti di valori di luminosità notturna artificiale. Infine, i risultati ottenuti sono stati utilizzati per scrivere dei codici Matlab che restituissero grafici utili all'interpretazione finale. Di seguito, i vari step nel dettaglio.

3.3.1 *Il software*

Un software GIS è un Sistema Informativo Geografico (Geographic Information System) studiato per la gestione del territorio che fornisce strumenti adeguati a eseguire analisi e rappresentazioni dello spazio e degli eventi che si verificano all'interno di esso. Pertanto, è in grado di acquisire, memorizzare, estrarre, trasformare e visualizzare dati spaziali provenienti dal mondo reale.

La tecnologia alla base di questi sistemi integra le qualità di un database con quelle di una mappa, in modo da fornire un risultato che fornisca dati georeferenziati mediante ad esempio cartogrammi, tabelle, mappe (Mussi, 2018).

All'interno di un sistema GIS sono disponibili informazioni appartenenti a diverse tipologie:

- Geometriche: relative alla rappresentazione cartografica degli oggetti rappresentati (punto, linea, poligono), la loro dimensione e posizione.
- Topologiche: relative alle relazioni reciproche tra oggetti.
- Informative: dati, associati ad ogni oggetto (sia di natura numerica che testuale).

I dati invece si distinguono in (GIS, s.d.):

- Raster: matrice di celle, dette pixel, di forma quadrata o rettangolare e di dimensione variabile. Ad ogni cella sono attribuite informazioni relative a ciò che esso rappresenta sul territorio. Sono adatti per rappresentazioni di dati con variabilità continua.
- Vettoriali: costituiti da elementi semplici memorizzati sulla base delle loro coordinate; a ciascuno di essi è attribuito un record nella tabella degli attributi che contiene uno o più campi (ossia colonne che contengono informazioni relative al singolo oggetto). Sono adatti per rappresentazioni discrete di oggetti della realtà.

Prima di iniziare a lavorare effettivamente col software è necessario avere un'idea chiara dei risultati che si vogliono ottenere per definire esattamente i dati necessari allo svolgimento dell'analisi; organizzare i dati in cartelle chiare ed esplicite, facendo in modo che non compaiano spazi o caratteri speciali nel nome (potrebbero creare problemi di raggiungimento dei dati al software) ed infine predisporre una cartella di back up dei file originali. Questo perché in un progetto QGIS si lavora direttamente sui file originali che il software recupera mediante il percorso indicato dall'operatore.

Creando un nuovo progetto per prima cosa va impostato un sistema di riferimento cui faranno riferimento tutte le mappe utilizzate. Chiaramente il tipo di sistema di riferimento dipenderà dal tipo di coordinate di cui desideriamo servirci e dalla zona in cui si localizza il nostro studio. La suddivisione principale in base alla tipologia di coordinate è la seguente:

Coordinate geografiche: la posizione di un punto è espressa mediante due angoli: l'uno rispetto all'equatore e l'altro rispetto al meridiano di Greenwich, definiti rispettivamente latitudine e longitudine del punto che si misurano in gradi decimali o sessagesimali. Esse valgono per scale molto vaste (nazionali).

- Coordinate piane o proiettate: la posizione del punto è espressa dalla sua distanza dall'equatore o da un meridiano di riferimento, espressa in metri o chilometri.
- Coordinate polari: la posizione del punto è espressa da una distanza e da un angolo rispetto ad un punto di riferimento; poco utilizzate.

Il sistema di coordinate è descritto da un nome, una descrizione dell'ellissoide di riferimento o del sistema di proiezione utilizzato e da un codice EPSG (univoco).

3.3.2 Preparazione dei dati ed impostazione del progetto

Il primo step dopo aver aperto un nuovo progetto è quello di importare all'interno di esso tutti i dati che ci serviranno per finalizzare l'analisi. Nel nostro caso avremo bisogno di:

- Raster, ottenuti da dati di luminosità notturna;
- Dati vettoriali, che identifichino i centroidi delle aree alluvionali in India e nel Regno Unito.

Per visualizzare sulla mappa i dati vettoriali, è necessario estrarli dal database del *Dartmouth Flood Observatory*. Dunque, realizziamo delle tabelle Excel⁸ dove figurino: i codici ID delle piene di interesse, le coordinate del centroide di ogni area alluvionale ed eventuali altre informazioni come data di inizio e fine della piena, numero di vittime coinvolte, ...

Poi, si salva il file come documento di testo con valori delimitati da tabulazioni (.txt); in questo modo sarà possibile caricare nel progetto GIS un file vettoriale che preveda come elementi i record contenuti nelle tabelle e descritti dai campi "ID piena", "latitudine", "longitudine".

⁸ Una per India ed una per Regno Unito.

Per prima cosa si caricano all'interno del progetto, tramite il Data Source Manager, i layer di interesse:

- Raster, GeoTiff relativi ai dati di luminosità dal 1992 al 2013, una per ciascun anno.
- Aggiunta di un layer definito "Testo delimitato", che consente di aggiungere al progetto delle tabelle in formato .txt ottenute dall'archivio del Dartmouth Flood Observatory. Nel nostro caso si estraggono dati riferiti a piene del periodo 1992-2013, con grado di severità pari a 2 e localizzate in India e nel Regno Unito.

Da questi layer è possibile poi estrarre degli shape file che saranno quelli che utilizzeremo nelle analisi.

Il risultato ottenuto sarà di una serie di raster sovrapposti (perché collocati tutti nella medesima zona) con una serie di punti che rappresentano i centroidi delle aree di inondazione.

Nel nostro caso lavoreremo su dei sistemi di coordinate piane specifiche per ciascun paese:

- EPSG: 7755, WSG84 LCC, India
- EPSG: ETRS89 LCC, Europe

Questo perché una delle operazioni che andremo ad effettuare è quella di *buffering chilometrico*, perciò è necessario disporre di coordinate proiettate e non geografiche, dato che specificheremo la distanza di buffer in chilometri.

Dato che i dati sulle piene a disposizione riguardano eventi che si sono verificati in anni differenti, cerchiamo di diversificare i simboli sulle nostre mappe. Cliccando col tasto destro sul layer vettoriale ed accedendo così al menu a tendina, possiamo aprire la finestra "proprietà". Essa è costituita da diciannove sezioni che possono essere selezionate tramite i riquadri a sinistra; il primo in alto consente di visualizzare un riassunto delle proprietà del layer in questione, tra esse figurano il nome del file, il

percorso del file, il tipo di geometria (punti, linee, poligoni), il sistema di riferimento, l'unità di misura, il numero di elementi presenti all'interno di esso ed ulteriori informazioni. La terza scheda è quella che ci consentirà di classificare la nostra geometria in base al colore ed è chiamata "Simbologia".

Sono disponibili vari opzioni per descrivere la simbologia degli elementi di un file vettoriale. È possibile indicare un simbolo singolo per tutti gli elementi di cui si potrà descrivere:

- Unità di misura: millimetri, pixel, pollici, ...
- Opacità e colore
- Dimensione
- Rotazione

Oppure si potrà scegliere un simbolo sempre singolo ma già predefinito.

Un'altra opportunità è quella di categorizzare gli elementi per colore/simbolo ed è possibile selezionando nel menu a tendina principale l'opzione "Categorizzato". Così si accede ad un menù che ci consente di selezionare un campo della tabella attributi, relativa al layer selezionato, che sarà il requisito di differenziazione dei simboli. Nel nostro caso vogliamo distinguere i simboli in base all'anno in cui si verifica l'evento, perciò selezioniamo "Began", ovvero la data di inizio di ciascun evento ed una scala di colori che possa essere adatta ai nostri scopi. Premendo il tasto "classifica", sarà visualizzabile sullo schermo un'anteprima dei risultati che si otterranno (figura 8).

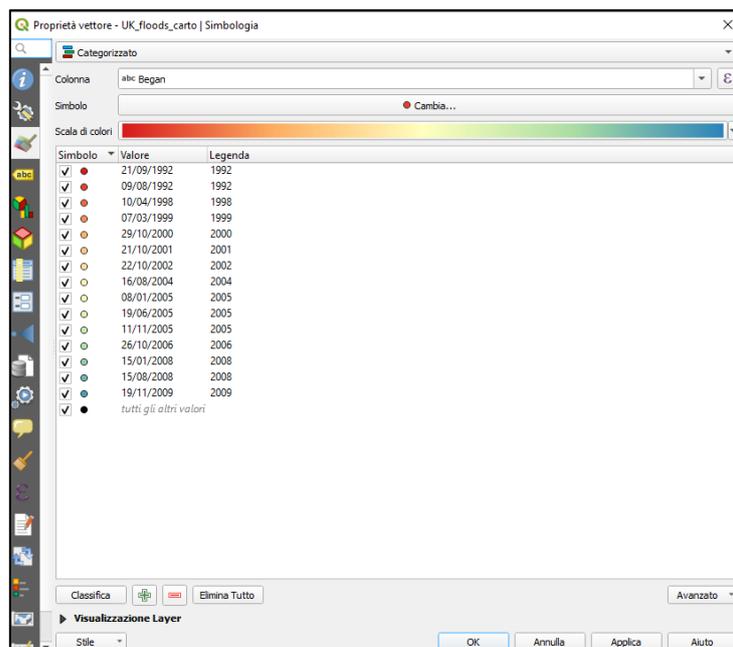


Figura 8. Proprietà. Simbologia. Categorizzato.

Un'altra opzione che ritroviamo nella sezione "proprietà" è quella di gestione dell'etichetta, a cui si accede premendo sul riquadro sottostante a quello dedicato alla simbologia. Mediante questa scheda è possibile assegnare a ciascun elemento della geometria un nome che compaia anche sulla mappa.

Nel nostro caso sono sufficienti etichette singole e identificate anche stavolta dal campo "Began", perché ci interessa l'anno di avvento di ogni piena. Inoltre, è possibile definire la dimensione del testo, il colore, l'opacità, la formattazione, eventuali effetti sul testo come buffer, sfondo, ombra, il tipo di visualizzazione dell'etichetta (figura 9).

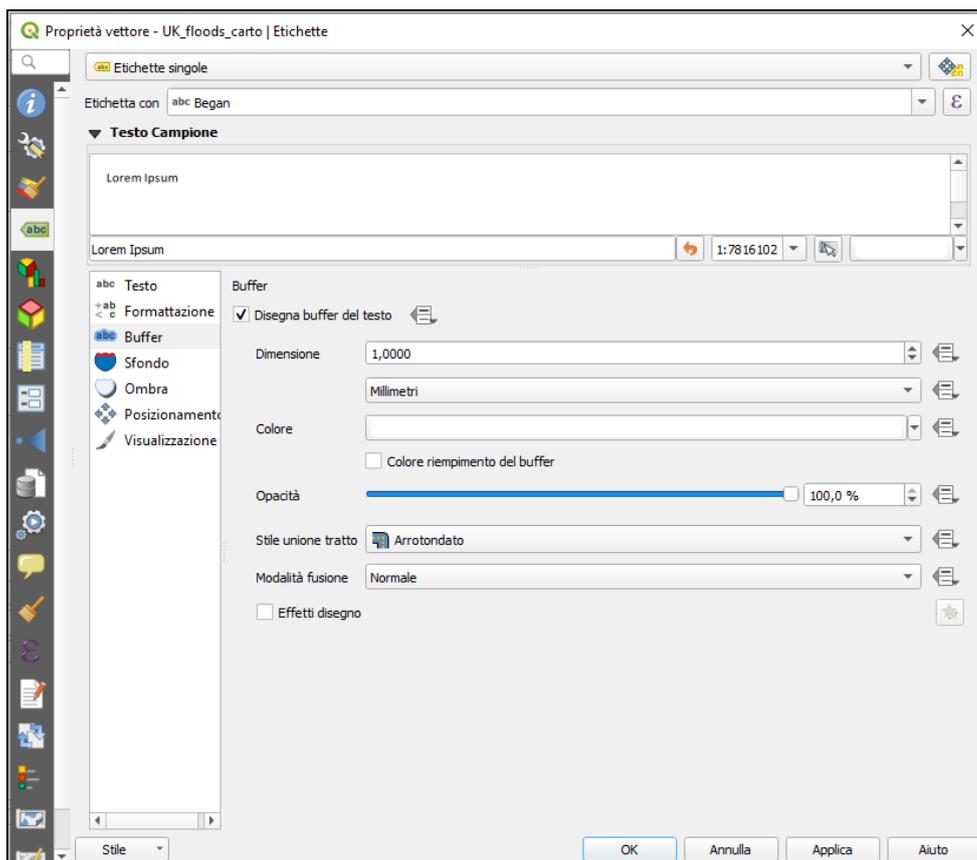


Figura 9. Proprietà. Etichette Singole.

3.3.3 Operazione di buffering

Il buffer è un'area che si può creare attorno agli elementi di un layer dato, che siano punti, linee o poligoni, ad una distanza indicata. L'area è calcolata come la superficie interna al cerchio di raggio r (distanza prescelta) con centro nel punto dello shape file.

Alle impostazioni di buffer si accede dal menu Vettore, Strumenti di Geoprocessing, Buffer. Si aprirà una finestra nella quale sarà possibile selezionare il layer in ingresso (nel nostro caso i centroidi delle aree soggette ad alluvione) ed il numero di segmenti da approssimare, maggiore sarà tale valore e più le chiusure dei buffer saranno approssimate ad archi (Brancucci, 2016). Inoltre, è possibile salvare il risultato dell'operazione in un file temporaneo, anche se ciò non è necessario dal momento

che poi è possibile estrarre gli elementi ottenuti come shape file salvandoli direttamente in quel formato (figura 10).

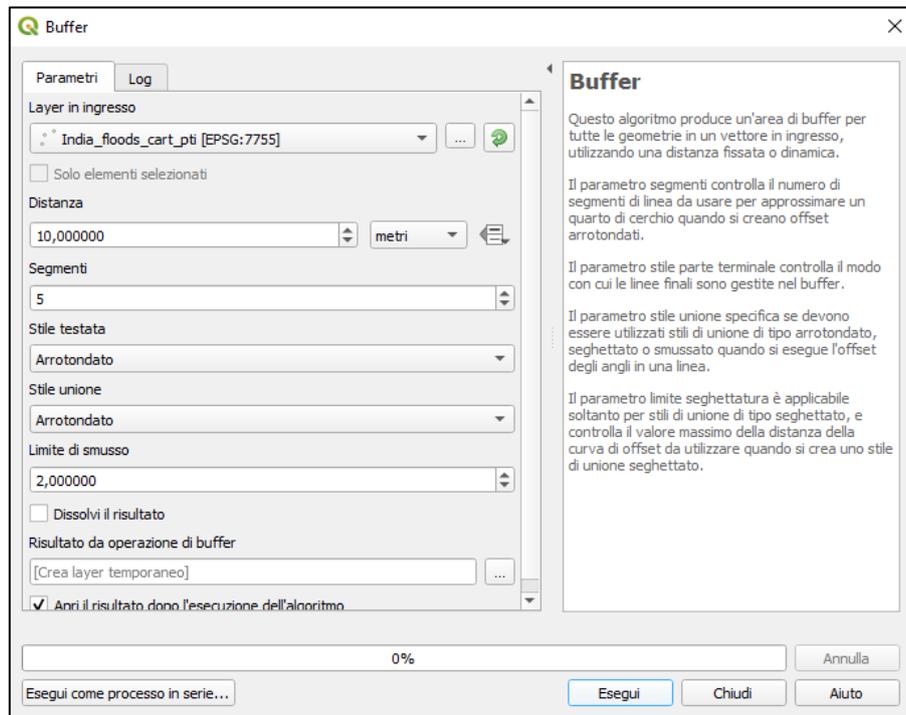


Figura 10. Finestra impostazione buffer.

Il risultato di un'operazione di buffer restituisce un'area che contorna gli elementi di uno shape file ad una distanza decisa dall'operatore. Nel nostro caso si realizzano aree circolari a distanze comprese tra 5 km e 100 km con passo di 5 km.

Di seguito un paio di esempi di buffer realizzati in zona indiana da 10 km a 30 km (figura 11).

Dato che molti buffer si intersecano tra loro, disattiviamo la funzione di dissolvenza per evitare che le aree afferenti a piene distinte siano considerate come buffer unici.

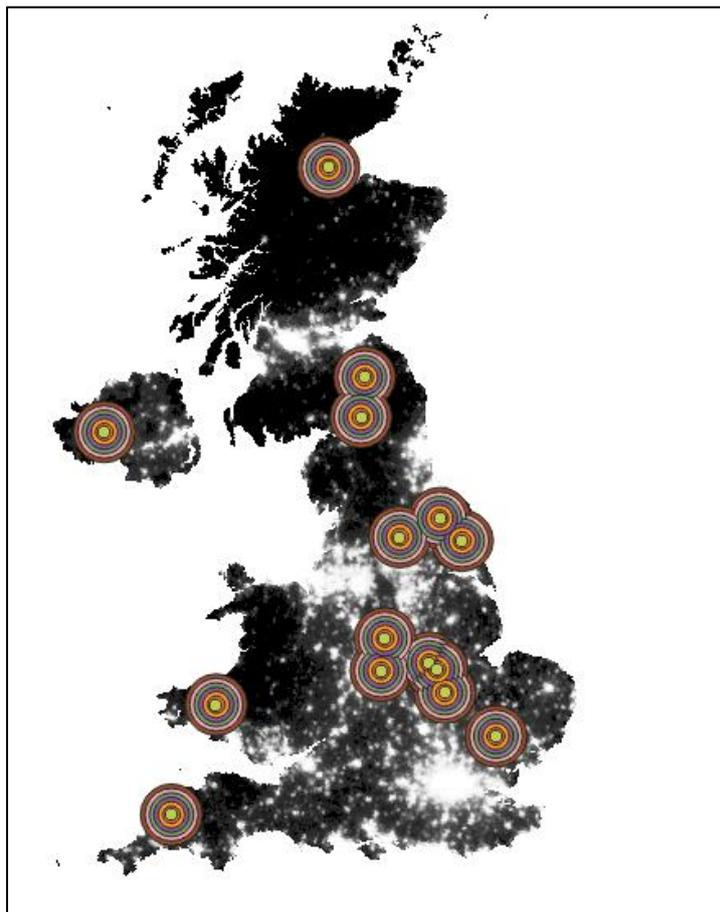
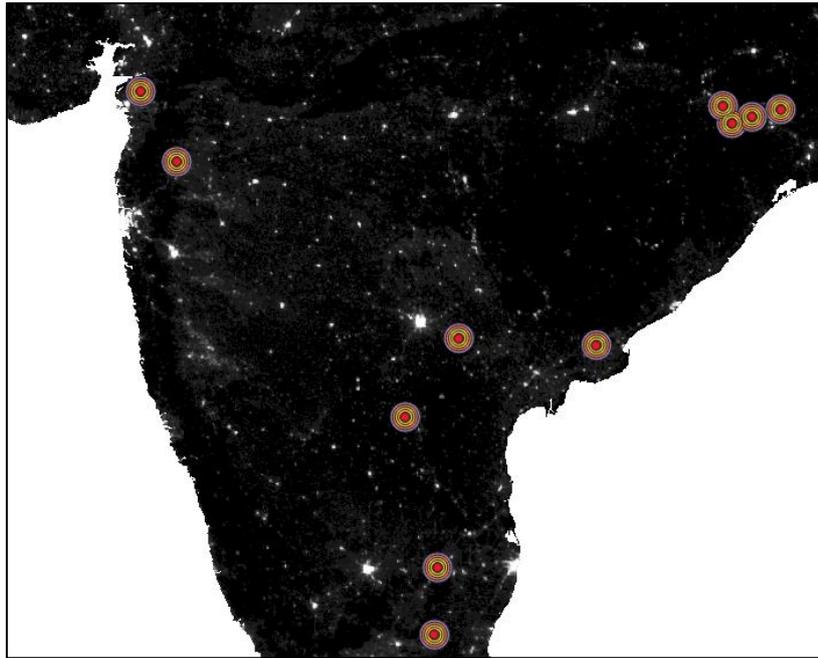


Figura 11. Esempi di buffer in India e Regno Unito.

Accedendo alla tabella degli attributi dei vari buffer, è possibile calcolare le aree di ciascuno di essi mediante la funzione “calcolatore di campi”. Le aree saranno calcolate in metri quadrati, perché il metro è l’unità di misura di base prevista del layer, perciò andrà convertita in chilometri quadrati.

3.3.4 Statistiche raster

Si tratta di uno strumento che si può utilizzare per fare dei calcoli interni ad un intero raster, ad esempio nel nostro caso per conoscere la somma dei valori dei pixel all’interno di esso.

A questo proposito è necessario apportare delle modifiche ai nostri raster, poiché essi prevedono delle zone in cui il dato di luce non è presente, in particolare laddove non sono presenti terre emerse. In questi casi, il valore attribuito al singolo pixel è di 128, il che va chiaramente a sovrastimare la sommatoria dei valori dei pixel, perciò quest’impostazione va modificata portando a zero il valore dei pixel sprovvisti di dati di luminosità.

L’operazione appena descritta è stata effettuata tramite la funzione “calcolatore raster”, disponibile dal menu a tendina “raster”. Si aprirà una finestra (figura 12) che consentirà di inserire delle stringhe che codificano operazioni da attuare alle singole immagini. Per ottenere il risultato cercato si deve inserire la stringa: `("nome raster" != 128) * "nome raster"`.

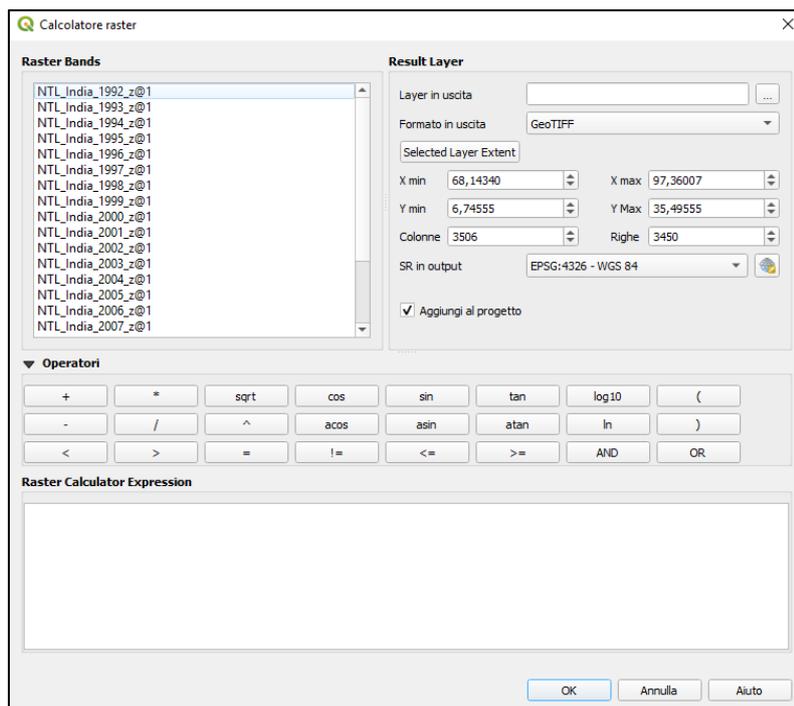


Figura 12. Raster. Calcolatore Raster.

Per concludere la statistica si seleziona dagli strumenti di geoprocessing, l'opzione "analisi raster" e all'interno di quest'ultima si seleziona "statistiche raster". Si aprirà una finestra (figura 13) che consente l'inserimento del raster da analizzare e le statistiche che si otterranno dopo l'esecuzione sono: massimo valore, minimo valore, valor medio, intervallo, deviazione standard, somma, numero totale di pixel.

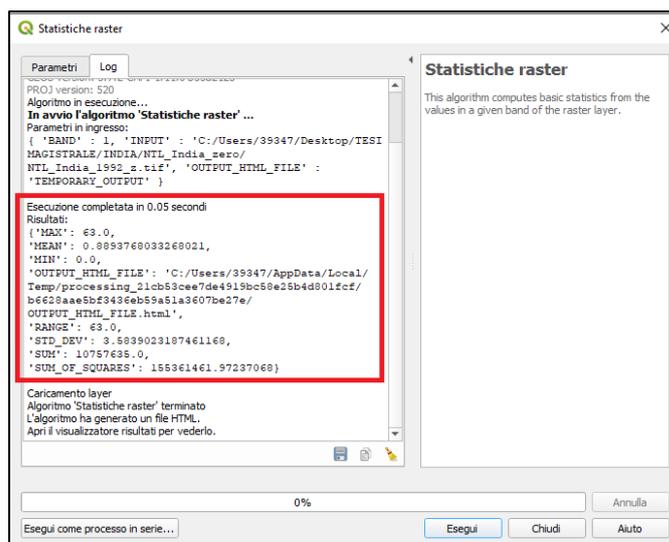


Figura 13. Strumenti di geoprocessing. Analisi raster. Statistiche raster.

3.3.5 Statistiche zonali

A questo punto restano da eseguire delle statistiche zonali affinché si possano correlare i raster relativi ai dati di luminosità di ciascun paese, con le aree di buffer che sono state costruite. Si tratta di un'operazione fattibile grazie ad un plug-in che permette di calcolare le statistiche riguardanti i valori dei pixel di un raster, con l'aiuto di un layer vettoriale. La statistica zonale genera colonne di output nel layer vettoriale che troveremo nella relativa tabella degli attributi.

Tra le possibili operazioni vi sono:

- Conteggio: conta il numero di pixel
- Somma: somma i valori dei pixel
- Media: calcola la media dei valori dei pixel
- Mediana: calcola la mediana dei valori dei pixel
- Dev. Standard: calcola la deviazione standard dei valori dei pixel
- Minimo: considera il valore minimo tra i pixel
- Massimo: considera il valore massimo tra i pixel
- Intervallo: calcola l'intervallo minimo-massimo tra i valori dei pixel
- Minoranza: considera il valore dei pixel meno rappresentato
- Maggioranza: considera il valore dei pixel più rappresentato
- Varietà: conta il numero dei valori differenti tra i pixel

Quella di nostro interesse è la somma. Per eseguire l'operazione si seleziona dagli strumenti di geoprocessing "Analisi raster" e poi "statistiche zonali" (figura 14). La funzione consente di inserire un raster ed un layer vettoriale che delimita il territorio in cui sarà effettuata la statistica (nel nostro caso i buffer), inoltre prevede la possibilità di selezionare quali operazioni eseguire tra quelle descritte pocanzi.

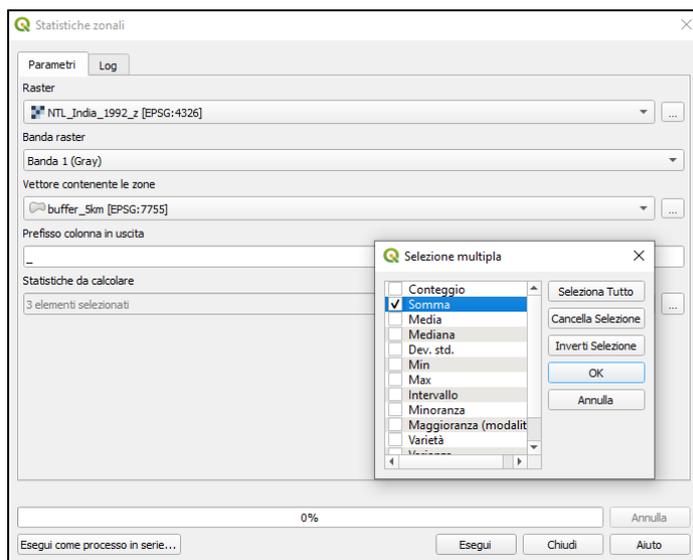


Figura 14. Strumenti di geoprocessing. Analisi raster. Statistiche zonali.

All'interno di una tabella attributi di uno shape file, è presente l'opzione "Calcolatore di campi" (figura 15). Sfrutteremo tale opzione per calcolare l'area interna ad ogni singolo buffer; questi dati serviranno per calcolare la luminosità media all'interno di ciascun buffer, sia in India che in Regno Unito.

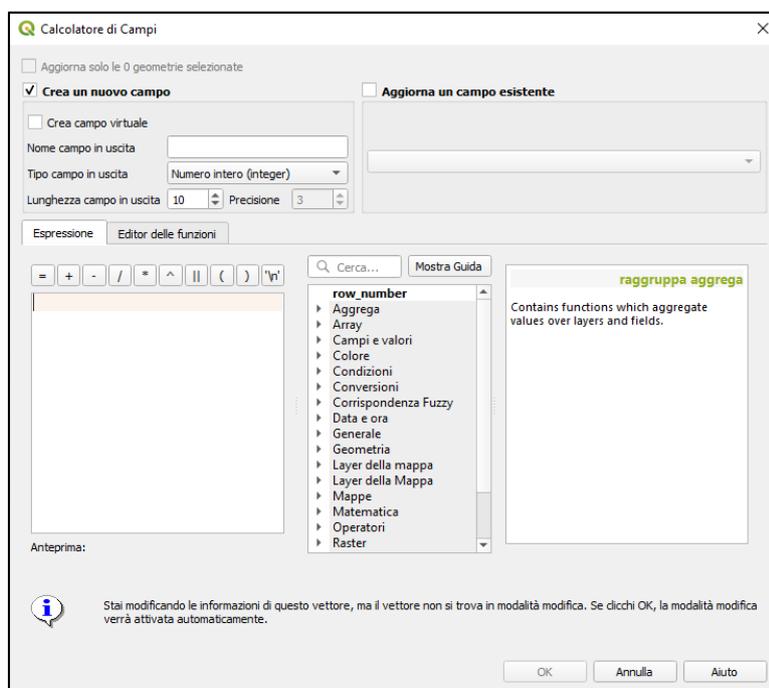


Figura 15. Calcolatore di campi.

Questa finestra consente di eseguire delle operazioni sui dati vettoriali in questione. Si può inserire il nome del campo in uscita (che comparirà nella tabella attributi), definire se il numero ottenuto sarà intero, decimale o una stringa, quanto sarà lungo e quale sarà la precisione del risultato del calcolo. L'espressione che vogliamo ottenere è l'area in chilometri quadrati, perciò l'espressione che richiederemo è $\$area/1000000$ perché i dati di partenza sono espressi in metri quadrati.

La verifica che si dovrà effettuare è che le aree alla stessa distanza di buffer dovranno essere, per ciascuna piena, uguali tra loro. Nel caso dell'India questa verifica è soddisfatta, mentre per il Regno Unito le aree non sono identiche, bensì variano in un range che si estende all'aumentare della distanza di buffer. Questa discordanza è dovuta alla scelta dei sistemi di riferimento: quello utilizzato per l'India è più performante perché specifico per quel paese, quello usato per il Regno Unito invece è un sistema di coordinate proiettate generico per il Nord Europa e quindi i risultati tendono ad essere più deformati. Per risolvere il problema è necessario installare un nuovo script di elaborazione in QGIS.

3.3.6 Script Python in QGIS

Quando si vogliono creare buffer su un'area vasta, non esistono sistemi di riferimento proiettati che forniscano risultati accurati. In questi casi sarebbe necessario che i buffer siano geodetici, con distanze misurate su un globo ellissoidale o sferico, tuttavia QGIS di per sé non supporta questo tipo di funzionalità. Una soluzione possibile è quella di sfruttare una proiezione azimutale equidistante per ciascun punto; con essa tutti i punti sulla mappa si troverebbero a distanze proporzionalmente corrette dal punto centrale, che nel nostro caso coincide col centroide dell'area inondata.

Grazie a *Python* è possibile scrivere uno script che consenta di eseguire queste operazioni. La logica alla base deve essere la trasformazione di una geometria di input in una proiezione equidistante azimutale, che generi il buffer planare (centrato sul file vettoriale di partenza) e che poi converta il risultato nella proiezione da cui si è partiti. Implementando lo script in QGIS, esso risulterà disponibile all'interno della finestra

Strumenti di Processing; le opzioni previste per la creazione dei buffer sono le stesse previste nella procedura tradizionale.

Effettuando questi passaggi si otterrà che, per ciascun buffer, le aree hanno tutte lo stesso valore, a prescindere dalla piena di riferimento, il che ci conferma che l'analisi sia corretta.

Un'altra verifica interessante può essere quella di verificare che i buffer generati abbiano dei raggi veritieri sia su QGIS che su Google Earth; per implementarli in Earth è necessario esportarli come file con estensione *kmf* e successivamente caricarli nella piattaforma. Si misurano poi con l'apposito strumento i valori dei raggi e si verifica che siano corretti (figure 16, 17 e 18).

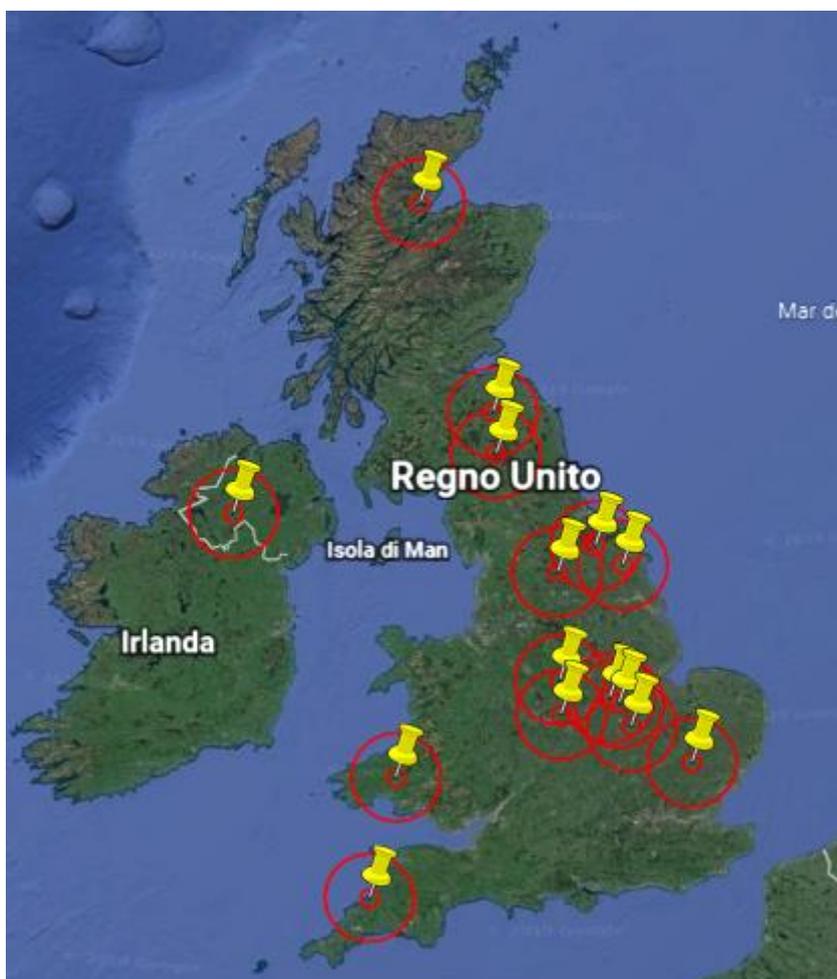


Figura 16. Localizzazione piene e buffer a 10km e 50km.

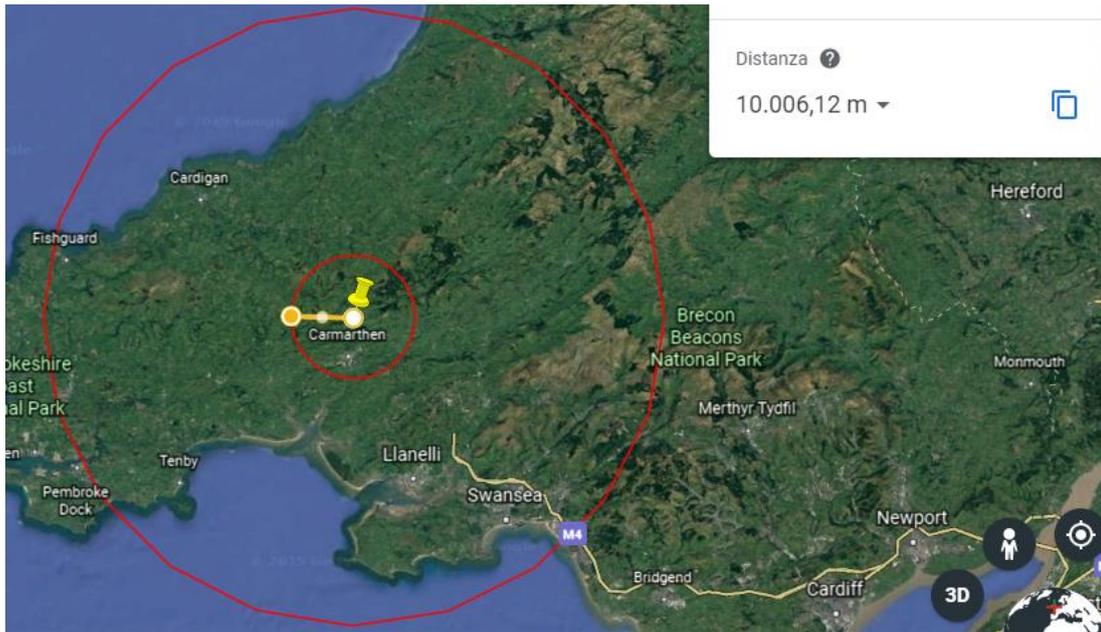


Figura 17. Verifica buffer a 10km.



Figura 18. Verifica buffer a 50km.

A questo punto abbiamo ottenuto tutti i dati di nostro interesse, che saranno implementati in uno script Matlab per l'elaborazione dei risultati.

I dati di interesse per ciascun paese saranno:

- Densità della somma delle luminosità presenti nei buffer da 5 km a 100 km dal centroide di ciascuna piena;

- Densità della somma delle luminosità totali presenti nel paese;
- Superfici totali occupate da ogni buffer;
- Superfici totali di India e Regno Unito.

3.4 *Analisi in Matlab*

Matlab (Matrix Laboratory) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C. Esso consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni, implementare algoritmi, eseguire dei calcoli scalari o vettoriali ed è composto da un'interfaccia costituita da diverse finestre. Quella di maggior interesse è il cosiddetto prompt dei comandi o Command Window. Si tratta di un'interfaccia in cui si possono digitare comandi e conseguentemente osservarne a video i risultati. Altro spazio di interesse è quello dedicato al Workspace dove sono sintetizzate tutte le variabili che sono state dichiarate (Matlab, s.d.).

Matlab comprende anche un editor in cui possono essere scritte e successivamente salvate delle sequenze di comandi (script), che possono essere eseguite in qualunque momento successivo al salvataggio. Ciascuno script va inizializzato con una serie di comandi standard che servono per pulire il workspace (*clear all*), chiudere i grafici aperti (*close all*) e pulire i comandi scritti precedentemente nella *command window* (*clc*).

Alcuni dei comandi fondamentali di cui ci serviremo sono i seguenti:

- *Zeros* (m,n): crea una matrice m x n avente tutti gli elementi uguali a zero;
- *Ones* (m,n): crea una matrice m x n avente tutti gli elementi pari ad uno;
- *Xlsread*: per leggere un file excel presente nel computer
- Ciclo *for*: per eseguire una serie di operazioni per ciascun elemento di un vettore facendo variare un indice dopo ogni operazione. Dopo il comando vanno specificati gli estremi di variabilità dell'indice e inoltre ogni ciclo va necessariamente concluso con un comando *end*.
- *Plot*: per creare dei grafici monodimensionali in cui siano specificate ascisse (variabili dipendenti) ed ordinate (variabili indipendenti); è possibile

specificare anche titoli degli assi, simbologia del grafico, titolo del grafico, legenda del grafico.

L'elaborazione del codice Matlab⁹, consentirà di ottenere come risultato venti matrici di tau-statistic per ogni paese, il cui raggio si estende tra i 5 km e i 100 km dal centroide, con passo di 5 km.

Dopo aver calcolato i valori della funzione statistica, si potrà procedere alla creazione di grafici per ciascun evento alluvionale considerato, tenendo conto di:

- Andamento della τ allo scorrere del tempo, cioè a partire dall'anno di avvento della piena e per tutti gli anni successivi sino al 2013;
- Andamento della τ al variare della distanza di buffer dal centroide, dai 5 km ai 100 km.

Le operazioni necessarie alla creazione dei grafici sono descritte dettagliatamente al capitolo 6 (Appendice).

⁹ Per la descrizione del codice per intero si rimanda all'Appendice (cap. 6).

4. Risultati

Il metodo della tau-statistic viene applicato sia all'India che al Regno Unito, consentendoci di analizzare l'evoluzione spazio-temporale della popolazione in seguito agli eventi di piena che si verificano in queste zone. Come già detto, l'archivio degli eventi estremi è estratto dai dati del Dartmouth Flood Observatory, dove le aree alluvionate risultano essere molto estese per tutti gli eventi estremi. Perciò, si è scelto di considerare i centroidi come punti rappresentativi di ogni evento alluvionale. Purtroppo, questa semplificazione conduce a risultati caratterizzati da una certa incertezza, poiché in tal modo si presuppone che l'analisi delle tau-statistic abbiano inizio esattamente dal centroide.

4.1 India

Il primo paese che è stato sottoposto ad analisi è l'India. Il clima del paese genera fenomeni estremi come siccità, inondazioni, cicloni, valanghe, frane causate da piogge torrenziali e tempeste di neve che provocano massicce perdite di vite e di proprietà e rappresentano solo alcune fra le minacce più gravi (Clima dell'India, Wikipedia).

Generalmente, le piene si riscontrano quando nel fiume vi è un livello d'acqua tale da oltrepassare gli argini naturali e la maggior parte delle volte si verifica una vera e propria calamità naturale. Dopo il Bangladesh, l'India è lo stato più colpito da questo genere di eventi. Contando il totale dei morti a causa di alluvioni in tutto il mondo, circa il 20% di essi proviene da regioni indiane. Negli ultimi anni inoltre, l'aumento della popolazione ha causato la nascita di nuovi villaggi sulle rive del fiume, rendendo il paese molto più vulnerabile alle alluvioni. Nel 1994 nel Kerala sono rimaste uccise 147 persone, nel 1995 nell'Uttar Pradesh ci fu un numero enorme di vittime e nel 1996 un'inondazione paralizzò letteralmente l'India, causando migliaia di morti.

Nell'archivio delle piene che è stato utilizzato, in India figurano ventiquattro piene avvenute tra il 1992 ed il 2013, di cui due (id: 757, 3338) saranno escluse dato che,

anche se la maggior parte dell'area alluvionata è in terra indiana, hanno il centroide localizzato in altri paesi (Bangladesh, Nepal). Al contrario, saranno incluse due piene il cui centroide ricade in India ma che hanno invaso maggiormente il Bangladesh (id: 1413, 2248).

La tabella 9 riporta l'archivio completo di eventi considerati in ordine cronologico:

ID piena	Anno	Durata	Zona	Regione	Causa
694	1992	69	sud	Tamil Nadu	Ciclone tropicale
1128	1996	14	sud	Andhra Pradesh	Ciclone tropicale
1413	1998	79	est	Meghalaya	Pioggia monsonica
1567	1999	14	centro	Orissa	Ciclone tropicale
1606	2000	6	est	Assam	Rottura di una diga
1623	2000	8	sud	Telangana	Breve pioggia torrenziale
1641	2000	33	centro-nord	Bengala Occ.	Pioggia monsonica
1747	2001	33	centro	Orissa	Pioggia monsonica
2248	2003	121	est	Assam	Pioggia monsonica
2507	2004	109	nord	Bihar	Pioggia monsonica
2680	2005	17	centro	Gujarat	Pioggia monsonica
2878	2006	8	sud	Kerala	Pioggia monsonica
2935	2006	46	centro	Maharashtra	Pioggia monsonica
3382	2008	7	centro	Orissa	Rottura di una diga
3539	2009	4	centro	Bengala Occ.	Rottura di una diga
3551	2009	17	sud	Andhra Pradesh	Precipitazione intensa
3636	2010	3	est	Assam	Precipitazione intensa
3852	2011	34	centro	Bengala Occ.	Pioggia monsonica
3854	2011	48	nord	Bihar	Pioggia monsonica
3983	2012	2	nord	Himachal Pradesh	Pioggia torrenziale
3987	2012	26	est	Assam	Pioggia monsonica
4001	2012	4	sud	Tamil Nadu	Tempesta tropicale
4069	2013	22	est	Assam	Pioggia monsonica
4091	2013	2	centro	Orissa	Tempesta tropicale

Tabella 9. Eventi alluvionali in India.

Si tratta di eventi di durata compresa tra 2 e 109 giorni, che hanno causato complessivamente circa 24000 vittime e 94 milioni di sfollati. Talvolta può accadere che le piene coinvolgano anche paesi confinanti come Bangladesh (Id: 2507,3852), Nepal (Id: 3854) o Pakistan (Id: 2935).

Le cause principali che hanno provocato le inondazioni sono le piogge monsoniche: violenti temporali che caratterizzano il subcontinente indiano e la Cina meridionale. Il principale responsabile è appunto il monsone, un vento ciclico dovuto alla grande differenza di temperatura che sussiste tra continente asiatico ed oceano. Esistono per l'esattezza due tipologie di monsone:

- Proveniente da sud-ovest, o monsone estivo, con venti caldi ed umidi che soffiano dall'oceano verso tutto il paese, causando un alto numero di precipitazioni da giugno a settembre.
- Proveniente da nord-est o monsone invernale, costituito da una massa d'aria secca e continentale che soffia dalla zona di alta pressione siberiana da dicembre a marzo. Ad eccezione di una stretta striscia costiera (Coromandel) nella porzione sud-orientale dell'India meridionale e dell'estremo nord (sopra il Kashmir), il resto del paese durante questa stagione non riceve acqua di precipitazione (Subrahmanyam, 1988).

In altre parole, durante la stagione delle piogge (giugno-settembre), accade che il subcontinente sia più caldo dell'oceano grazie all'insolazione, generando condizioni di bassa pressione sulla terra emersa e alta sull'oceano. Di conseguenza, si inverte anche la direzione dei venti dominanti che non spireranno più dalla terra al mare, come nel periodo invernale, ma dal mare al continente emerso. La risalita dell'aria marittima lungo i rilievi, ne provoca il raffreddamento con conseguente condensazione, così le masse d'aria riversano il loro carico d'acqua causando un netto aumento della piovosità sul continente e specialmente sulle pendici esterne dei Ghati Occidentali (oltre 2000 mm, con stagione umida di 4-5 mesi), ai piedi del Himalaya e nell'Assam (Redazione "notizie.it", 2018).

Nel 2017 il primo ministro Narendra Modi riconobbe la situazione critica del cambiamento climatico: "Il cambiamento climatico, il ciclo alterato delle stagioni e la trasformazione dell'ambiente stanno avendo un impatto fortemente negativo, rendendo avverse le condizioni vitali della popolazione. Le colture, le infrastrutture,

le strade, l'elettricità, le vie di comunicazione, tutto è affetto dal problema delle inondazioni" (Gandhi, 2017).

4.1.1 Inquadramento geografico e demografico

L'India è il terzo stato per estensione in Asia ed il settimo nel mondo. Confina a nord-ovest col Pakistan, a nord est con la Cina, il Nepal ed il Bhutan, a est col Myanmar ed il Bangladesh e ricopre una superficie di 2973190 km².

Oltre alla penisola indiana stessa comprende anche gli arcipelaghi delle Laccadive (Mare Arabico), delle Andamane e delle Nicobare (al largo del Golfo del Bengala).

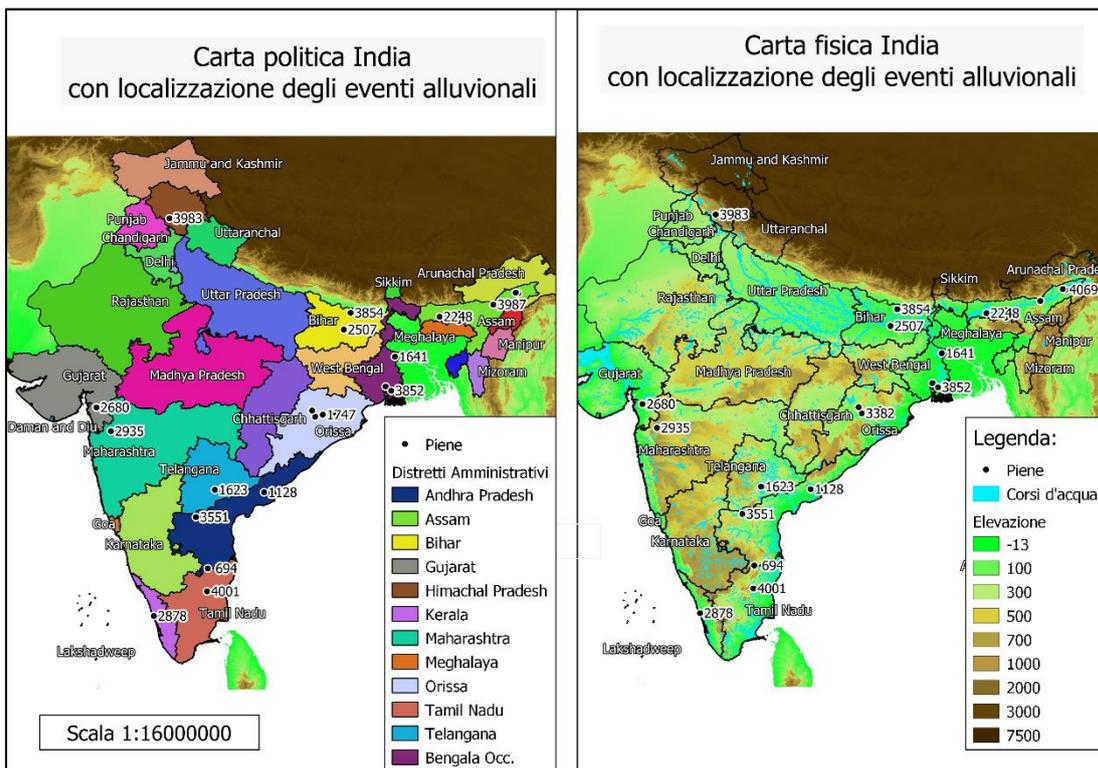


Figura 19. India, cartina politica e fisica.

Le carte sono state generate col software QGis.

L'India può essere suddivisa in quattro regioni naturali principali: quella dell'Himalaya (zona settentrionale), quella della pianura indogangetica (zona centrale), quella

dell'altopiano del Deccan (zona centro-meridionale) e quella dei Ghati orientali e occidentali (zone costiere meridionali). L'Himalaya è la più alta catena montuosa del pianeta e cinge l'India a nord e a nord-est. Immediatamente a sud delle cime, il movimento tettonico creò un vasto avvallamento che successivamente fu riempito con sedimenti alluvionali e diede origine all'attuale pianura indogangetica. Questo territorio si estende dai piedi dell'Himalaya fino al tavolato del Deccan e ad esso si collegano la pianura del Punjab e quella dell'Assam. L'altopiano del Deccan è una zona che ricopre circa un milione e mezzo di chilometri quadrati, delimitata a nord dalla linea immaginaria che collega Tapti e Mahanadi, presenta alcune fra le rocce di più antica formazione. Infine, i Ghati sono rilievi longitudinali localizzati a sud della penisola e alti in medio 1000 metri a Occidente e sui 600 metri ad Oriente, dove sono più ampi ed intervallati (Inftub, s.d.).

Dalla catena himalayana hanno origine grandi fiumi che hanno generato la pianura indogangetica; più precisamente possiamo citare l'Indo, a ovest e per la maggior parte in territorio pakistano e ad est il Gange ed il Brahmaputra col loro delta a ridosso del confine col Bangladesh. Queste zone sono quelle più densamente popolate al mondo, il che fa sì che i danni provocati da potenziali inondazioni siano più ingenti che nel resto del globo. Inoltre, abbiamo già evidenziato come la vulnerabilità al rischio ed il grado di sofferenza siano determinati, oltre che alla semplice esposizione ai pericoli naturali, anche dal livello di sviluppo umano, che in India non è poi così incoraggiante.

Il Gange, tra i corsi d'acqua menzionati, è quello che per la maggior parte del tempo scorre in India ed ha origine nell'Himalaya meridionale. Il fiume scorre in senso parallelo alla catena montuosa, e cioè nella zona settentrionale del paese ed è parte di un bacino che occupa una superficie di più di un milione di chilometri quadrati. Esso presenta vari affluenti sia di destra, come lo Yamuna, che di sinistra, come il Ghaghara (detto anche Karnali). Alla fine del suo corso, entra nella regione del Bengala dove si divide in numerosi rami, quello principale continua in Bangladesh per confluire col Brahmaputra e sfociare poi nel Golfo del Bengala.

La zona della golena del Ghaghara (figura 20) è una di quelle con maggior frequenza di alluvioni e presenta una densità di popolazione che supera le 200 persone per chilometro quadrato. Infatti, a causa dell'aumento della popolazione, l'uomo ha iniziato ad insediarsi anche all'interno delle valli e delle pianure alluvionali del fiume. Le zone abitate si trovano nella zona pericolosa, continuamente soggetta a inondazioni e ad erosioni laterali, specialmente dove il canale stretto è confinato da sedimenti sabbiosi e limosi poco compatti. Infatti, da uno studio granulometrico è emerso che i sedimenti sono di sabbia fine, un materiale granulare, non coesivo e poco compatto.

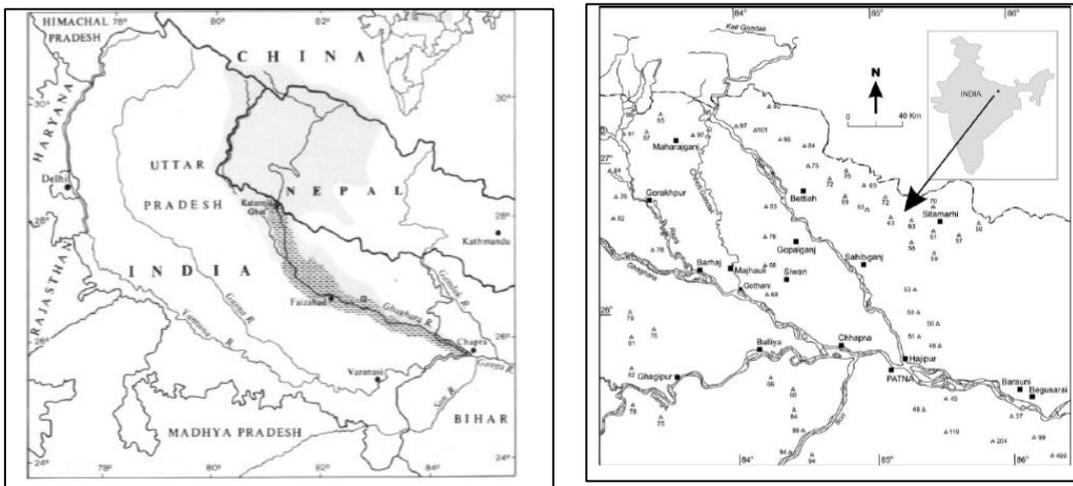


Figura 20. Localizzazione del Ghaghara.

Il flusso nel fiume è intensissimo durante la stagione dei monsoni, tanto che prima della confluenza col Gange, scarica molto di più di quest'ultimo, ecco perché la zona è frequentemente teatro di alluvioni (Kayastha & Yadava, 1985).

La densità di popolazione in India è di circa 385 abitanti/km² e si stima che fra meno di dieci anni riuscirà a diventare il paese più popolato al mondo, superando la Cina. Secondo l'ONU, la popolazione indiana è destinata a crescere per i prossimi 50 anni, raggiungendo il picco nel 2100 con 1,75 miliardi di abitanti (Manietti, 2015).

4.1.2 Applicazione della metodologia tau-statistic per eventi alluvionali registrati in India: analisi dei risultati

Gli eventi alluvionali considerati sono stati divisi in base alle zone in cui si sono verificati, perciò i risultati finali saranno presentati seguendo una suddivisione regionale.

Le informazioni riguardanti le regioni indiane, l'idrografia e la localizzazione delle zone inondate, sono state reperite da siti web di informazione (Wikipedia, Indiatoday) e tramite Google Earth, in cui si è caricato il file *kml* che contiene le coordinate dei centroidi delle aree alluvionali.

Le regioni interessate da inondazioni, partendo dall'estremo settentrionale della penisola, sono le seguenti:

1. Himachal Pradesh
2. Bihar
3. Assam
4. Meghalaya
5. Bengala Occidentale
6. Gujarat
7. Maharashtra
8. Orissa
9. Telangana
10. Andhra Pradesh
11. Tamil Nadu
12. Kerala



Figura 21. India. Immagine satellitare con localizzazione dei centroidi delle aree inondate.

I risultati verranno analizzati sulla base (1) dell'evoluzione temporale della tau-statistic, a partire dall'anno in cui si è verificato l'evento, e (2) della variabilità spaziale della tau-statistic, valutata in funzione della distanza dal centroide dell'area allagata. I risultati verranno riportati a partire dalle aree settentrionali dell'India verso quelle meridionali. Le regioni in cui si è manifestato il maggior numero di eventi sono Assam e Orissa. Difatti, è risaputo che mentre alcune aree del nord e del sud della penisola combattono con fenomeni siccitosi, il nord-est e le coste orientali e occidentali sono sempre più colpiti da piogge torrenziali (Rai, 2019).

Himachal Pradesh

L'Himachal Pradesh è una regione dell'India settentrionale che si trova a ridosso dell'Himalaya occidentale (figura 22).

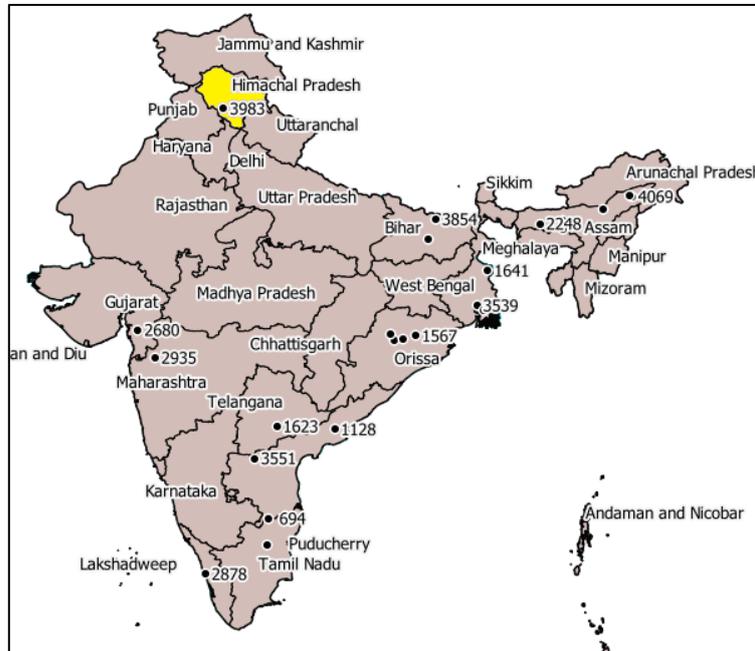


Figura 22. Localizzazione della regione dell'Himachal Pradesh.

È costituita da un territorio prevalentemente montuoso ed è attraversata dai bacini dell'Indo e del Gange, i cui corsi d'acqua principali sono: Chenab, Ravi, Beas, Sutlej e Yamuna.

Sul fiume Sutlej si localizza un serbatoio artificiale denominato Gobind Sagar, esteso per 88 km in lunghezza ed 8 km in larghezza, ottenuto grazie alla diga di Bhakra. In India è la seconda diga in termini di quantità di accumulo di acqua dopo la Sagar Dam, in Madhya Pradesh.

La densità di popolazione in Himachal Pradesh è di 123,16 abitanti/km², un valore piuttosto basso se paragonato a quello delle altre regioni indiane. In questa zona si

verifica un'inondazione importante nel settembre 2012 (id: 3983), a causa di una pioggia torrenziale che colpisce proprio la zona del Gobind Sagar (figura 23).



Figura 23. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione dell'Himachal Pradesh.

Dato che la piena avviene un anno prima del termine del periodo in cui si dispongono i dati, si analizzeranno esclusivamente i grafici che descrivono l'evoluzione spaziale della tau-statistic data come differenza tra la situazione registrata nel 2013 (ultimo anno di dati disponibili) e quella nel 2012 (anno di avvento della piena).

L'evoluzione spaziale della tau-statistic mostra i seguenti comportamenti (figura 24):

- A 5 km di distanza dal centroide dell'evento alluvionale, si osserva un valore positivo di tau-statistic, pari a circa 1,6. Tale risultato è principalmente legato ad un aumento più marcato della luminosità media a livello di buffer rispetto alla situazione nell'intera India (figura 24).
- A 10 km di distanza dal centroide, i valori di tau-statistic risultano negativi e circa pari a -2. Questa situazione riflette una dislocazione o diminuzione di popolazione all'interno del buffer considerato, rispetto ad un aumento generalizzato a livello nazionale (figura 25).

- Per distanze superiori a 10 km, i valori della tau-statistic risultano pressoché nulli, evidenziando una sostanziale invarianza tra l'aumento di luminosità media notturna nei buffer e nell'intero territorio indiano.

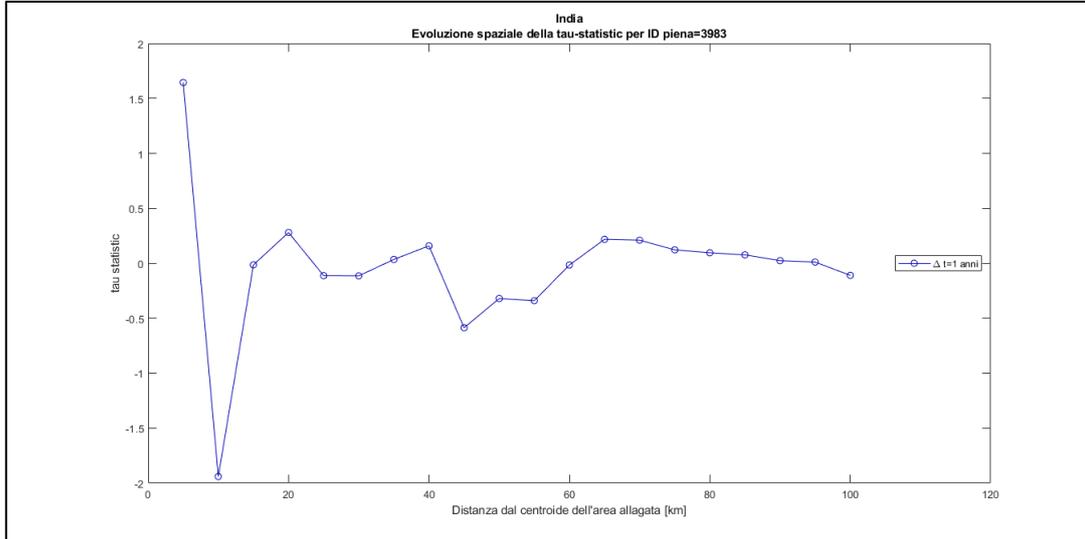


Figura 24. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3983 avvenuto nel 2012 nella regione dell'Himachal Pradesh.

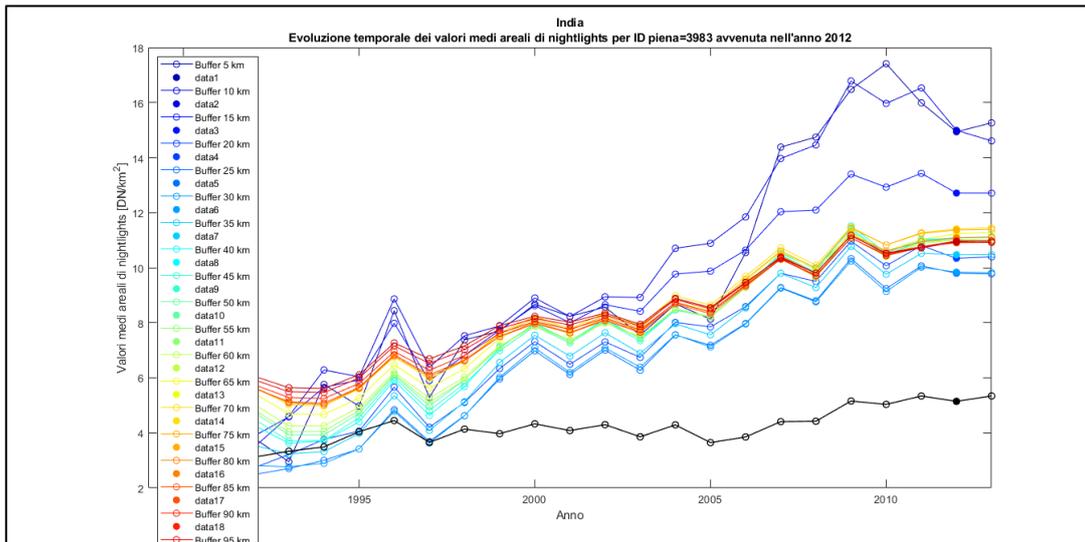


Figura 25. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità artificiale notturna per l'evento alluvionale id: 3983 avvenuto nel 2012 nella regione dell'Himachal Pradesh.

Bihar

Il Bihar è una regione dell'India Nord-orientale e fa parte della valle del Gange, chiusa a nord dalla catena himalayana e a sud dall'altopiano del Deccan (Figura 26).

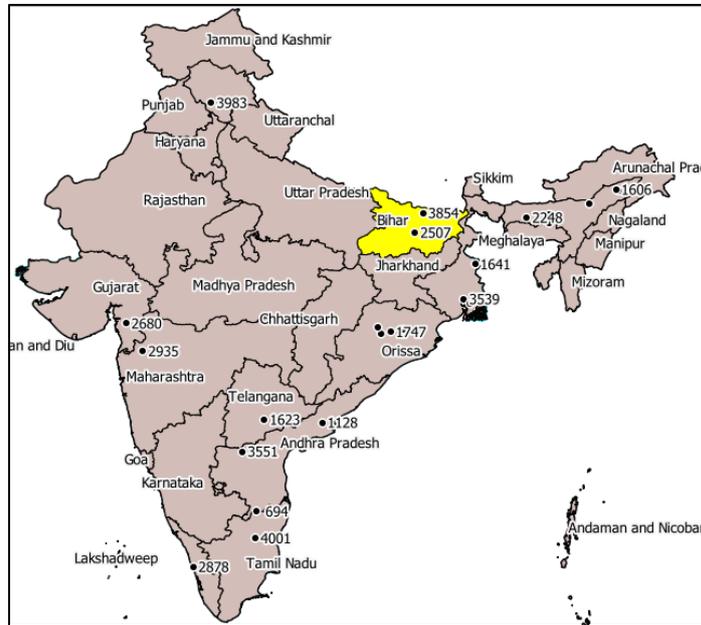


Figura 26. Localizzazione della regione del Bihar.

Pochi mesi fa, questa zona è stata teatro di una grave inondazione (luglio 2019), che ha causato oltre 120 vittime (Agenzia Nova, 2019). Si tratta dell'area indiana più soggetta ad alluvioni tanto che il 76% della popolazione che vive nelle zone settentrionali si è trovato una o più volte sotto minaccia di devastazione a causa di inondazioni. Infatti, quando si verificano forti piogge nelle zone montane del Nepal, quell'acqua sgorga nei fiumi Koshi, Bagmati e Narayani in maniera così violenta che spesso avviene la rottura dei loro argini. In seguito, questi corsi d'acqua sfociano nelle pianure del Bihar, distruggendo villaggi e insediamenti. Ad esempio, nel 2008 si verificò una breccia nell'argine del Koshi orientale, a seguito della quale furono sommersi vari distretti del Nepal e dell'India (Koshi (fiume), s.d.).

Tra le regioni analizzate il Bihar è quella che presenta la massima densità di popolazione con 1102,38 abitanti/km².

Nel periodo studiato (1992-2013) si verificano due eventi di piena di severità pari a 2 in Bihar (Figura 27): la prima (id: 2507) è avvenuta nel 2004 nei pressi del Gange ed è stata una delle alluvioni più significative tra quelle studiate, dato che è durata 109 giorni ed ha causato circa 3000 morti. L'altra (id: 3854) è un'inondazione che ha visto protagonista il Koshi ed è durata poco più di un mese nel settembre 2011.

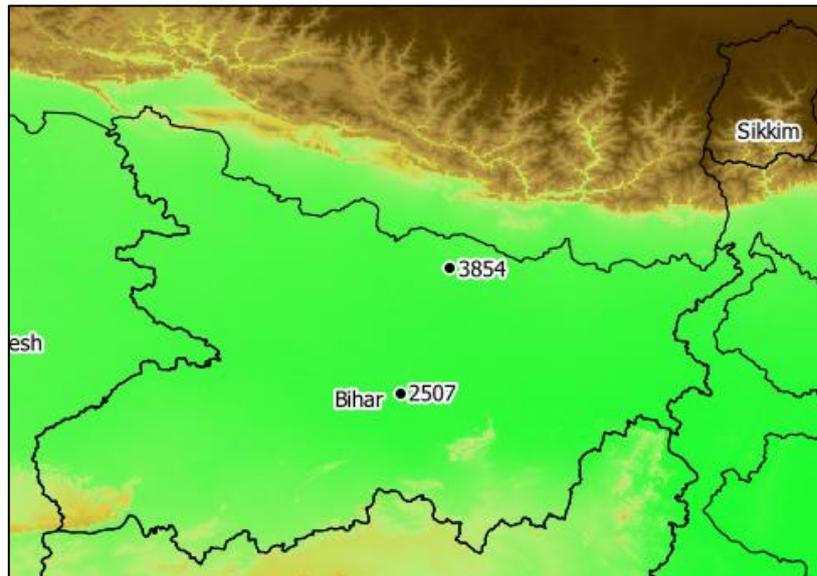


Figura 27. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione del Bihar.

Per l'alluvione avvenuta nei pressi del Gange nel 2004 (id: 2507), l'evoluzione spaziotemporale della tau-statistic mostra i seguenti comportamenti (Figura 28):

- Nel periodo immediatamente successivo all'evento alluvionale, ovvero dopo 1 e 2 anni dalla piena (2005 e 2006 rispettivamente), si osservano valori leggermente positivi o negativi di tau-statistic nell'arco di 20 km dal centroide. Tale risultato è principalmente legato ad una diminuzione della luminosità media a livello indiano piuttosto che ad una dislocazione di popolazione in prossimità dell'evento alluvionale (Figura 29).
- A partire dal 2007, ovvero tre anni dopo l'evento alluvionale, fino al termine del periodo analizzato (2013, dopo 9 anni dall'evento di piena), si riscontrano valori positivi di tau-statistic nell'arco di 40 km. Questa situazione riflette una

concordanza tra i trend di luminosità media notturna osservati a livello nazionale e a livello di buffer (Figura 29).

- Per distanze superiori a 40 km dal centroide, i valori della tau-statistic risultano pressoché nulli, evidenziando una sostanziale invarianza tra aumento di luminosità media notturna nei buffer e nell'intero territorio indiano.

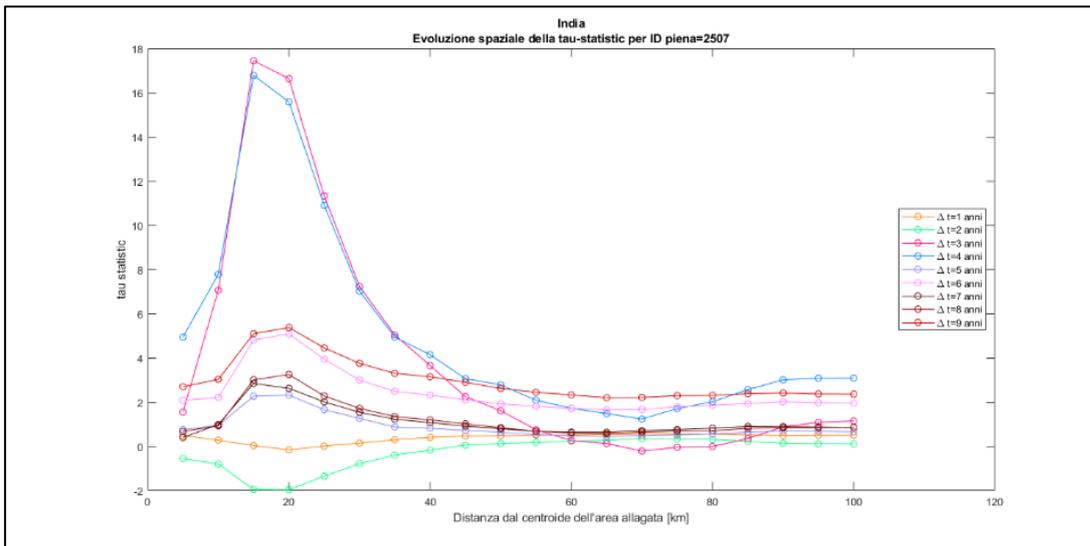


Figura 28. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2507 avvenuto nel 2004 nella regione del Bihar.

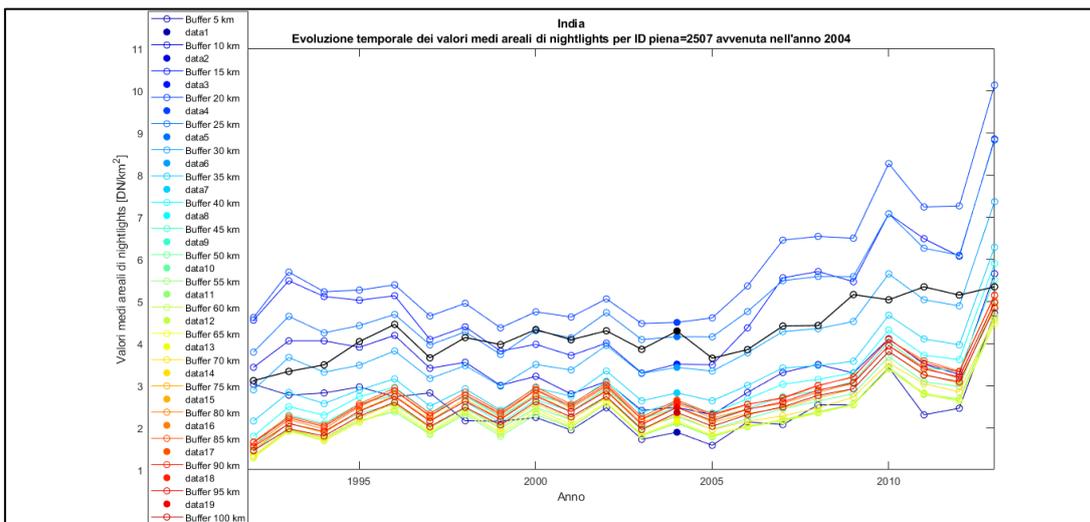


Figura 29. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id:2507 avvenuta nel 2004 nella regione del Bihar.

L'alluvione avvenuta nel 2011 (id: 3854) è anch'essa attribuita ad una pioggia monsonica, ma si è abbattuta su un corso d'acqua minore rispetto al Gange, interessando un'area nettamente inferiore. È opportuno evidenziare che il centroide dell'evento alluvionale esaminato si trova in prossimità del confine settentrionale dell'India: per buffer a partire da 30 km di distanza dal centroide si avranno valori nulli di luminosità notturna, che ridurranno considerevolmente il valore medio spaziale. Tale situazione condiziona negativamente l'analisi effettuata, i cui risultati saranno da considerarsi poco affidabili. L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic (Figura 30) mostra infatti valori nulli di tau-statistic dopo un anno dall'evento alluvionale. Dopo due anni, si osservano valori marcatamente positivi legati ad un significativo aumento di densità media all'interno dei singoli buffer, rispetto al trend nazionale (Figura 31).

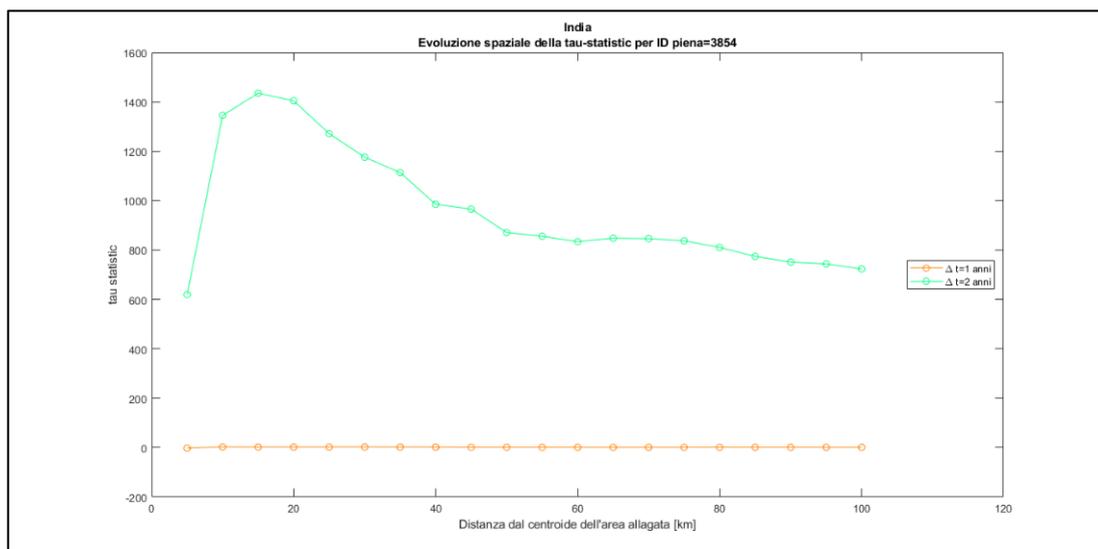


Figura 30. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3854 avvenuto nel 2011 nella regione del Bihar.

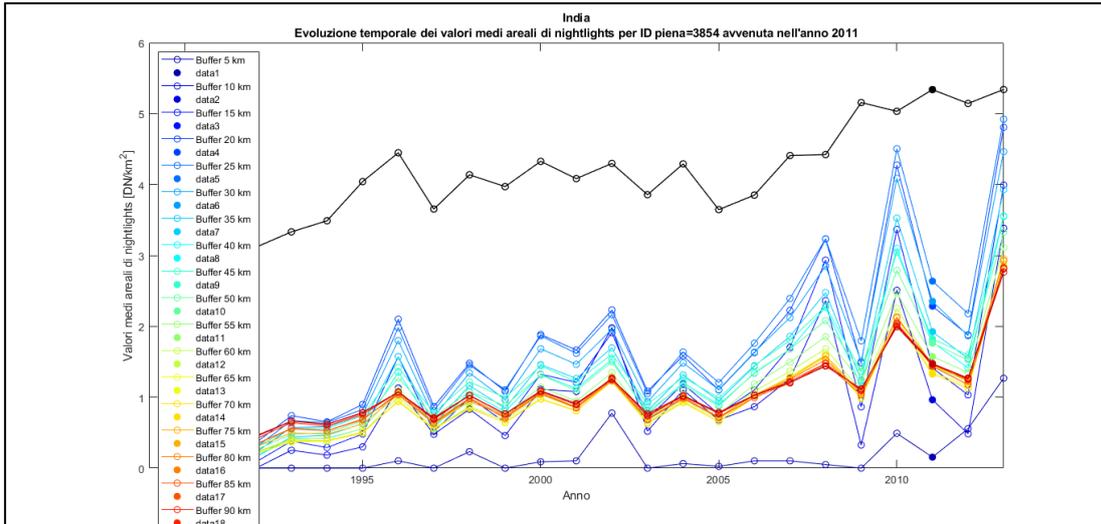


Figura 31. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id:3854 avvenuto nel 2011 nella regione del Bihar.

Assam

L'Assam è una regione dell'India nord-orientale che insieme agli Stati di Arunachal Pradesh, Nagaland, Manipur, Mizoram, Tripura e Meghalaya costituisce i cosiddetti Seven Sister States, che sono collegati con il resto del territorio indiano tramite una striscia di terra larga 22 km: il cosiddetto corridoio di Siliguri, nel Bengala Occidentale (Figura 32).

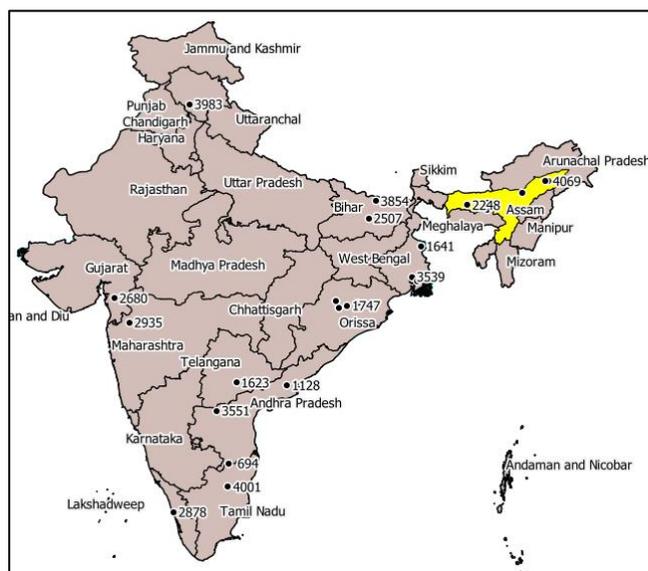


Figura 32. Localizzazione della regione di Assam.

Il corso d'acqua principale della zona è il Brahmaputra, che nasce in Tibet e scorre verso est lungo il versante settentrionale dell'Himalaya, in territorio cinese. Poi, dopo aver aggirato la catena montuosa, piega verso sud ed attraversa due stati indiani, facendo poi il suo ingresso in Bangladesh dove confluisce nel delta del Gange, per poi sfociare nel Golfo del Bengala.

Dopo essere entrato nell'Assam il fiume si allarga arrivando ad ampiezze di 10 km e si divide in due rami che si riuniscono creando la più grande isola fluviale indiana, Majuli.

All'interno della regione dell'Assam si sono verificate 5 inondazioni (Figura 33) nel periodo 1992-2013, ovvero id: 1606 nel 2000, id: 2248 nel 2003, id: 3636 nel 2010, id: 3987 nel 2012, id: 4069 nel 2013. Nelle pagine seguenti verranno descritti solamente i primi 4 eventi. Relativamente all'ultimo evento (id: 4069), non è stata effettuata alcuna analisi in termini di tau-statistic, poiché non sono disponibili dati di luminosità notturna successivi all'anno di avvento dell'alluvione.

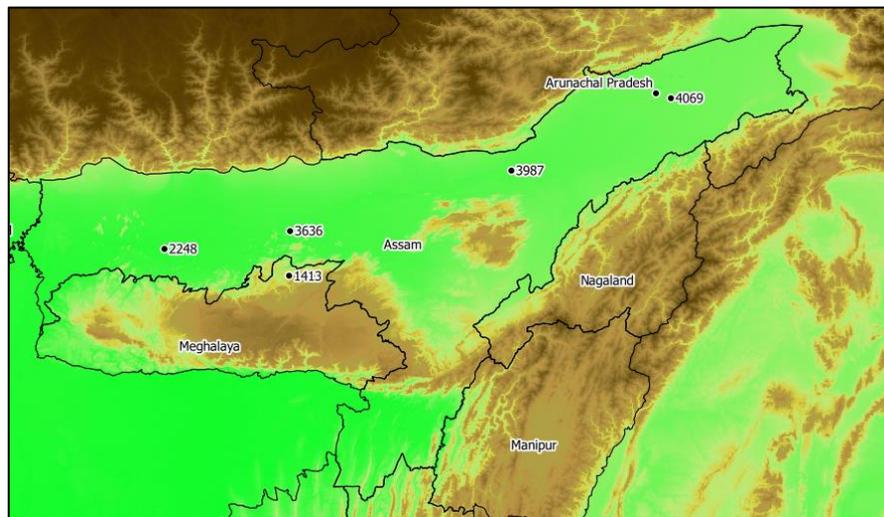


Figura 33. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Assam.

L'evento alluvionale id: 1606 è avvenuto nel giugno del 2000. Tale evento ha colpito la zona situata sul corso settentrionale del Brahmaputra, nei pressi del parco nazionale di Dibru-Saikhowa, per un'intera settimana, causando 30 vittime e migliaia

di sfollati (id:1606). L'evoluzione spazio-temporale della tau statistic mostra i seguenti comportamenti (Figura 34):

- Il primo anno successivo all'evento di piena, si registrano valori di tau-statistic vicini allo zero a qualsiasi distanza di buffer, il che indica che non ci sono state variazioni di interesse tra gli aumenti di luminosità notturna all'interno dei buffer e quelli registrati nella totalità del territorio indiano; già dal secondo anno la situazione cambia radicalmente: a partire dai 15 km di distanza dal centroide si osserva un aumento di tau-statistic che raggiunge il picco a 35 km di distanza dal centroide. Osservando i valori medi areali di luminosità notturna (Figura 35) si evince che sia la densità di popolazione totale in India, che quelle relative ai buffer considerati sono in diminuzione rispetto alle stesse dell'anno 2000.
- Dal 2003 in poi (dopo tre anni dall'evento di piena), i valori tendono a stabilizzarsi intorno allo zero, ad eccezione del quarto, in cui si ha diminuzione tra i 15 ed i 40 km, e successivamente un lieve aumento, e a 7-8 anni in cui vi è una diminuzione dai 25 ai 70 km. Per indagare meglio a tal proposito sarebbe interessante conoscere gli andamenti relativi agli anni successivi al 2013, poiché proprio in questo anno si verificherà un nuovo evento alluvionale a circa 100 km da quello appena citato (id: 4069). Ad ogni modo, dall'osservazione dell'evoluzione dei valori medi areali di luminosità (figura 35), si deduce che, mentre i valori negativi di tau-statistic che si osservano a 4 anni dall'evento di piena sono legati a diminuzione di densità di luminosità totale in India, quelli a 7 e 8 anni dipendono da un abbassamento delle densità nei singoli buffer.
- Con l'aumentare della distanza, i valori di tau-statistic tendono a ristabilirsi quasi tutti intorno allo zero ma per l'anno 2002 si mantengono sempre valori

di tau-statistic positivi e per gli anni 2007 e 2008 si mantengono valori di tau-statistic negativi, per gli stessi motivi sopracitati.

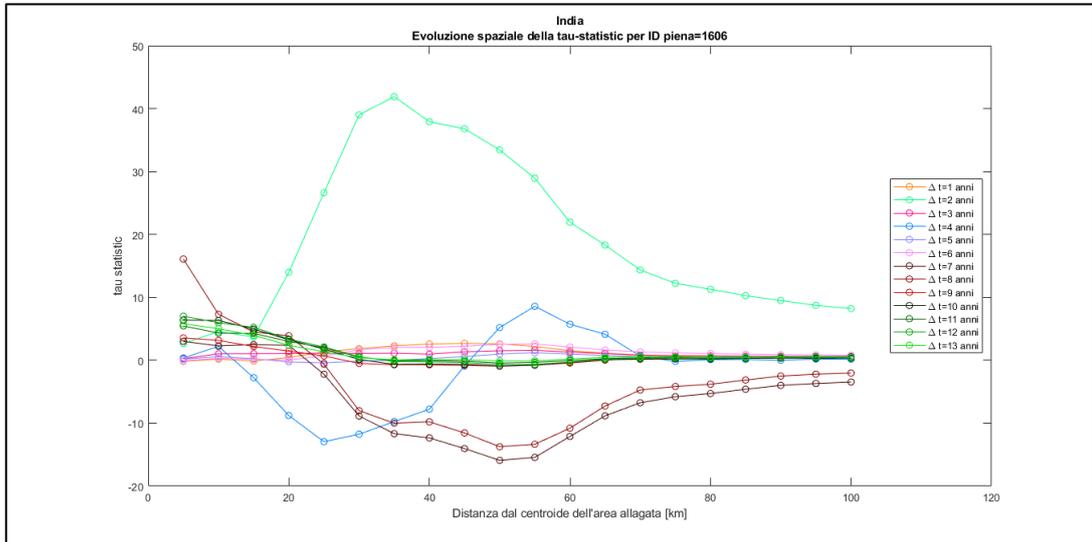


Figura 34. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1606 avvenuto nel 2000 nella regione di Assam.

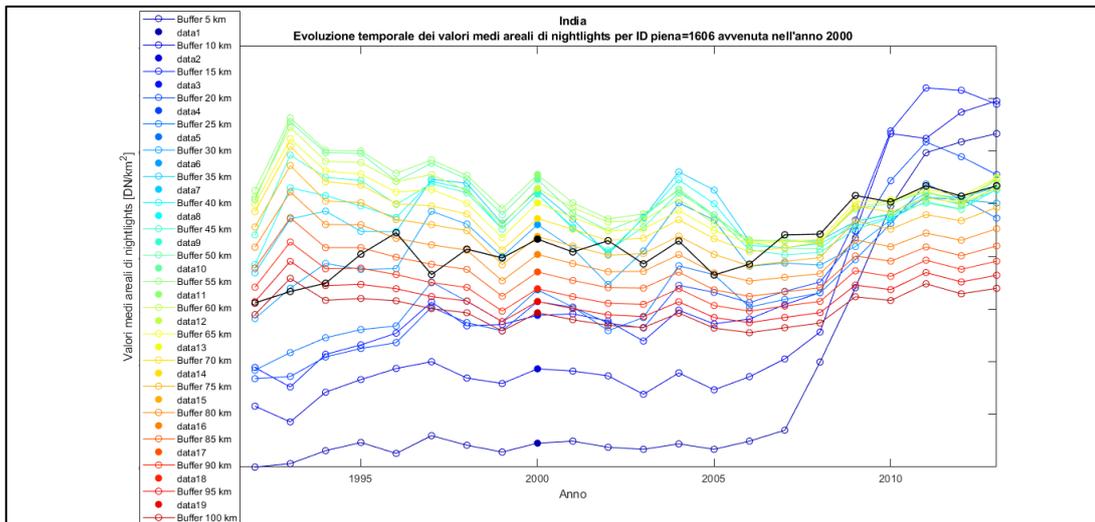


Figura 35. Evoluzione spatio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1606 avvenuto nel 2000 nella regione di Assam.

Relativamente all'evento alluvionale id: 2248 avvenuto nel 2003, l'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 36):

- Per i primi due anni successivi all'evento alluvionale (rispettivamente 2004 e 2005), non si registrano variazioni significative della tau-statistic, tanto che i valori restano vicini allo zero a indicare che non si riscontrano differenze tra i valori di densità di luminosità notturna legati ai buffer e quelli relativi all'intero Paese.
- Il terzo anno invece (2006) presenta delle variazioni consistenti: nell'intorno dei 15 km si osserva un lievissimo aumento, seguito negli anni successivi da una drastica diminuzione fino a 35 km di distanza dal centroide. Dato che la densità di luminosità nello stato indiano è in diminuzione dal 2003 al 2006, si otterrà un valore negativo nel calcolo del denominatore della tau-statistic (mentre il numeratore aumenta per tutti i buffer tranne che per i primi due). Oltre i 35 km si ha di nuovo un lieve aumento ma restiamo comunque su valori di tau-statistic negativa, perché aumenta la densità all'interno delle aree di buffer coinvolte. Per gli altri anni invece si ha stabilità.

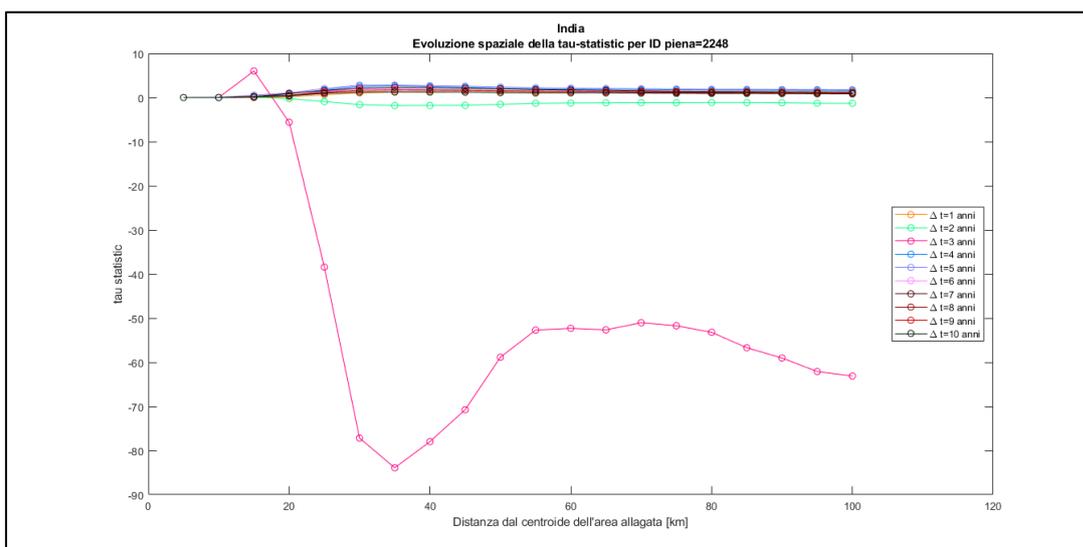


Figura 36. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2248 avvenuto nel 2003 nella regione di Assam.

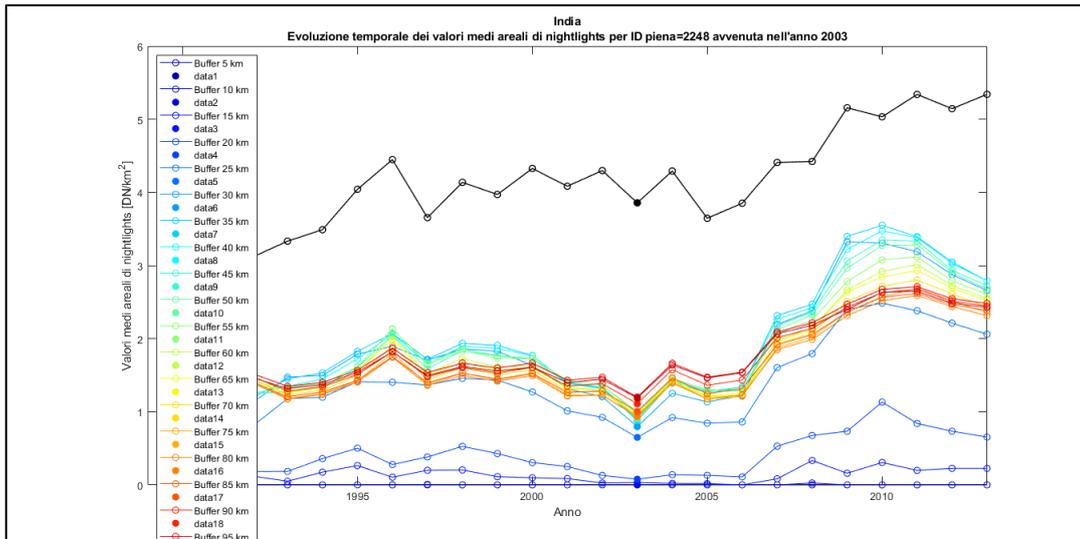


Figura 37. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali delle densità di luminosità artificiale notturna per l'evento alluvionale id: 2248 avvenuto nel 2003 nella regione di Assam.

L'evento alluvionale con id: 3636 si è verificato nell'Aprile del 2010. Si tratta di un'alluvione di lieve entità, la quale non ha destato particolari preoccupazioni rispetto alle altre, evidenziando degli spostamenti significativi soltanto a 5 km dal centroide della piena, così come riportato in Figura 38.

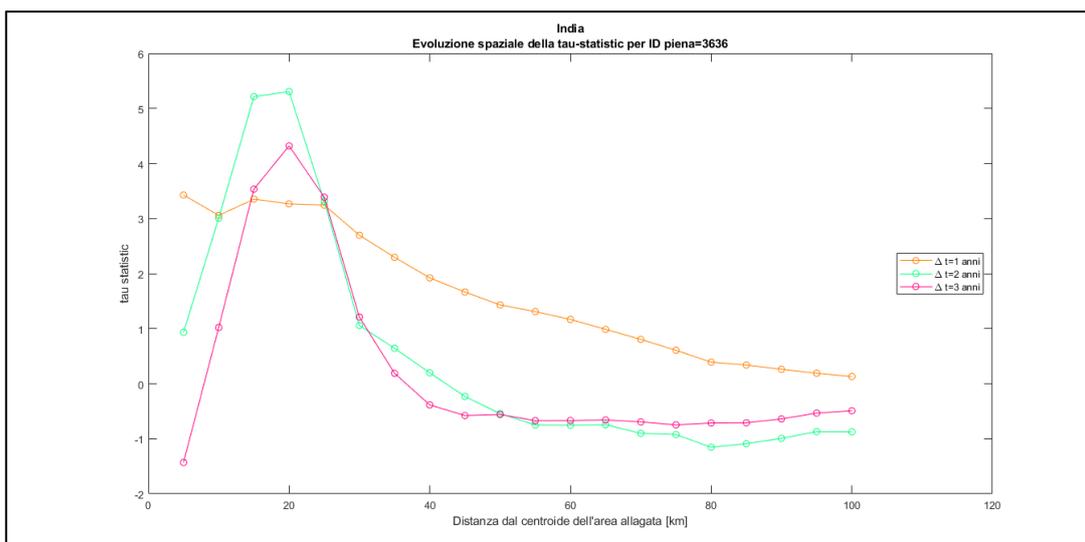


Figura 38. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3636 avvenuto nel 2010 nella regione di Assam.

L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra infatti i seguenti comportamenti:

- L'anno 2011 (il primo dopo l'evento di piena), mostra dei valori di tau-statistic positivi a partire da circa 3,5. Questi valori tendono a diminuire con l'aumentare della distanza, fino ad assestarsi intorno allo zero. Dalla figura 39 si evidenzia come i valori positivi di tau-statistic nel 2011, siano dovuti ad un ripopolamento delle zone colpite dall'alluvione.
- Anche durante il secondo ed il terzo anno si denota una rilocalizzazione della popolazione nei pressi delle zone colpite, specialmente entro i 20 km di distanza dal centroide.
- Per distanze maggiori (oltre i 20 km) i valori di tau-statistic tendono a diminuire fino a stabilizzarsi dai 40 km in poi.

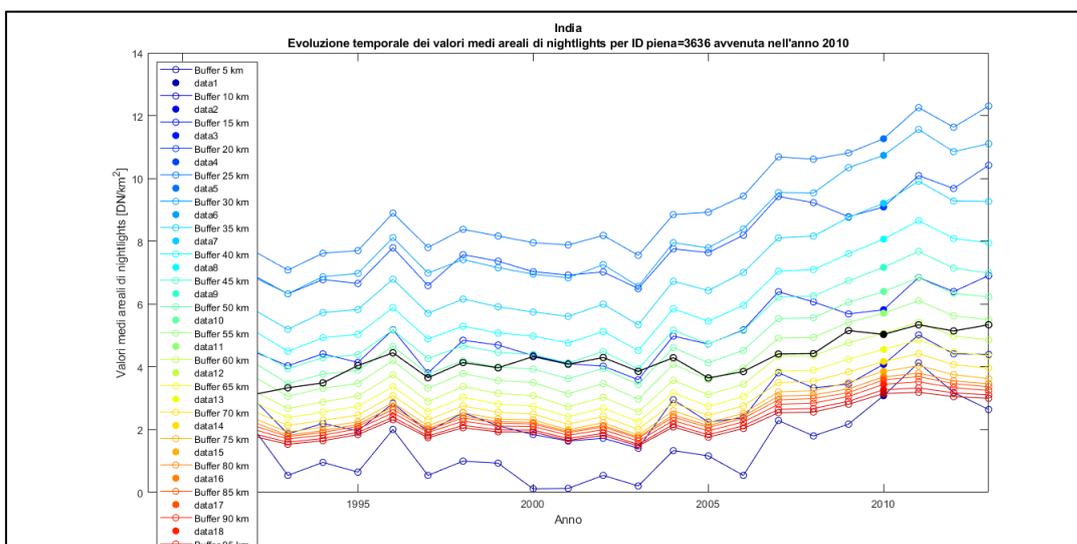


Figura 39. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali della luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3636 avvenuto nel 2010 nella regione di Assam.

Infine, l'evento alluvionale id: 3987 verificatosi nel 2012 e localizzato sul punto di biforcazione dei due rami del fiume Brahmaputra, mostra la seguente evoluzione spaziale della tau-statistic (Figura 40): nell'anno successivo all'alluvione si osservano

valori di tau-statistic in calo (-2,5) per distanze di buffer fino a 15 km. Successivamente, i valori tornano a crescere per riasestarsi intorno allo zero all'aumentare della distanza. La diminuzione di tau-statistic osservata risulta dovuta ad un abbassamento di densità nei buffer vicini al centroide (Figura 41).

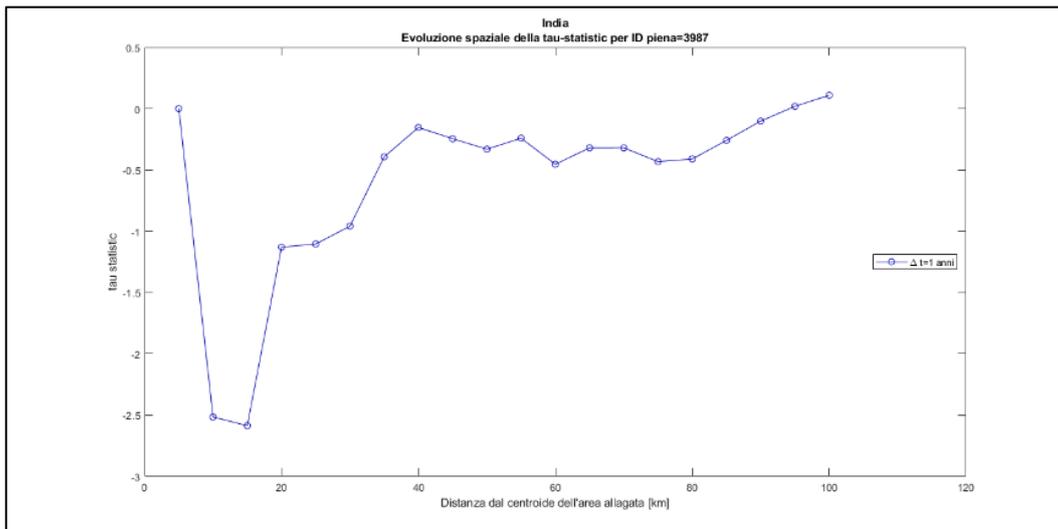


Figura 40. Evoluzione spazio-temporale della tau statistic per l'evento alluvionale id: 3987 avvenuto nel 2012 nella regione di Assam.

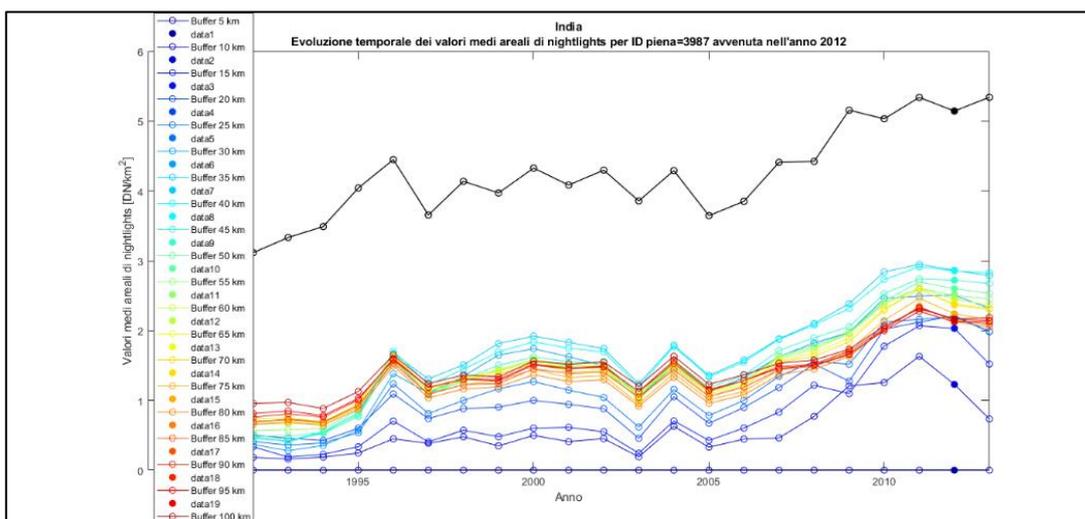


Figura 41. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3987 avvenuto nel 2012 nella regione di Assam.

Meghalaya

Il Meghalaya è una piccola regione dell'India nord-orientale, prevalentemente montuosa, che declina a Nord nella valle del Brahmaputra, anche se non è bagnata dall'omonimo corso d'acqua, e a sud nelle grandi pianure del Bangladesh (Figura 42).



Figura 42. Localizzazione della regione di Meghalaya.

In questa regione si verifica un solo evento alluvionale di interesse per il nostro studio, che si localizza proprio nelle zone vallive del Brahmaputra, quasi al confine con l'Assam, registrato nel 1998 (Figura 43). Il codice di riferimento dell'inondazione è id: 1413 e come sempre i grafici a disposizione partono dall'anno seguente a quello in cui l'evento si è verificato.

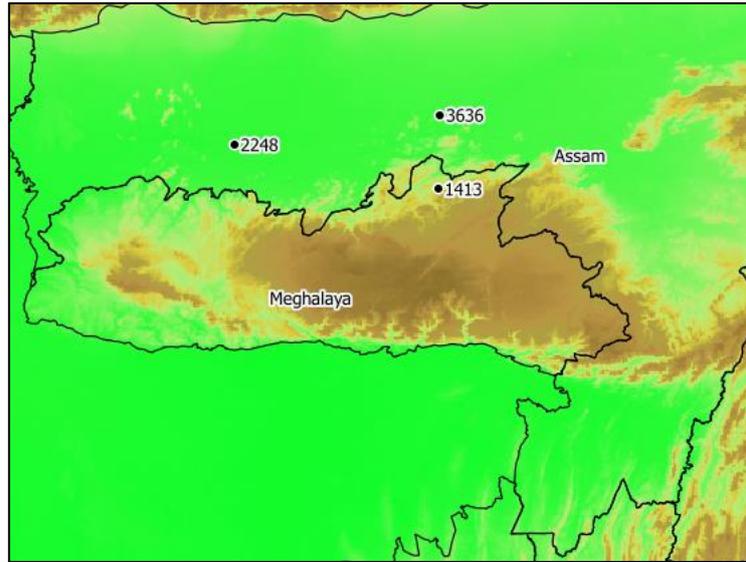


Figura 43. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Meghalaya.

L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti comportamenti (Figura 44):

- Il primo anno dopo la piena si evidenziano dei valori di tau negativi per piccole distanze di buffer, dovuti al fatto che dall'anno 1998 al 1999 si abbassano le luminosità totali del paese (la densità di luminosità locale invece è in aumento). Tale fenomeno si verifica anche tra il 2000 ed il 2001, ovvero dopo 2-3 anni dall'evento di piena, infatti per quel periodo figurano di nuovo valori negativi di tau. A 6 anni dall'evento alluvionale si osserva un innalzamento dei valori di tau-statistic dovuto ad un ripopolamento delle zone colpite dalla piena, poiché la popolazione perde evidentemente memoria dell'evento avvenuto nel 1998. I valori si riabbassano all'ottavo anno perché decresce la densità nell'intera India (Figura 45), infatti tra il 1998 ed il 2013 si osservano i valori più bassi di luminosità totale nel biennio 2005-2006.
- Per valori elevati di distanza di buffer le tau-statistic si stabilizzano tra valori di -2 e +2.

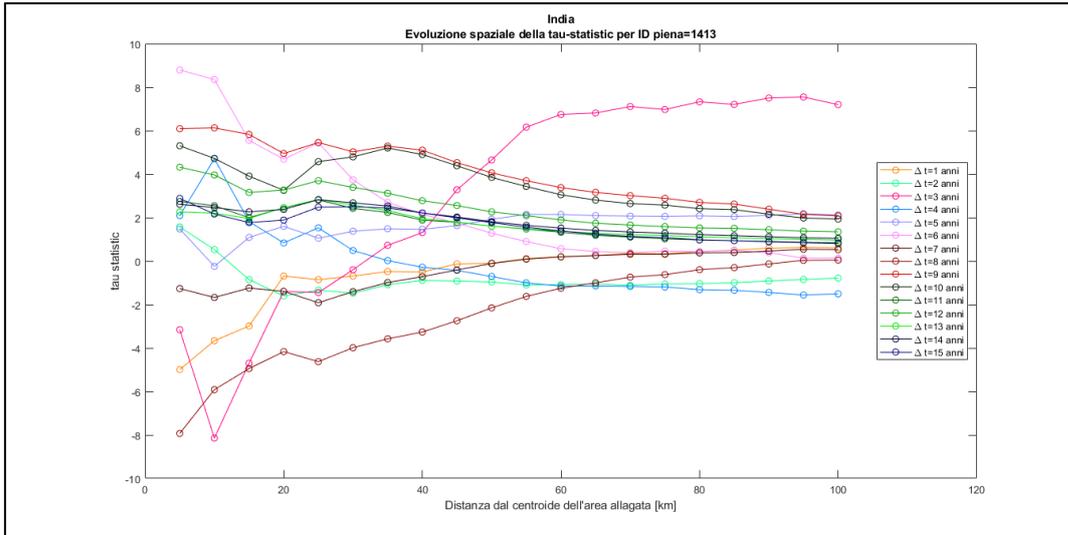


Figura 44. Evoluzione spatio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1413 avvenuto nel 1998 nella regione di Meghalaya.

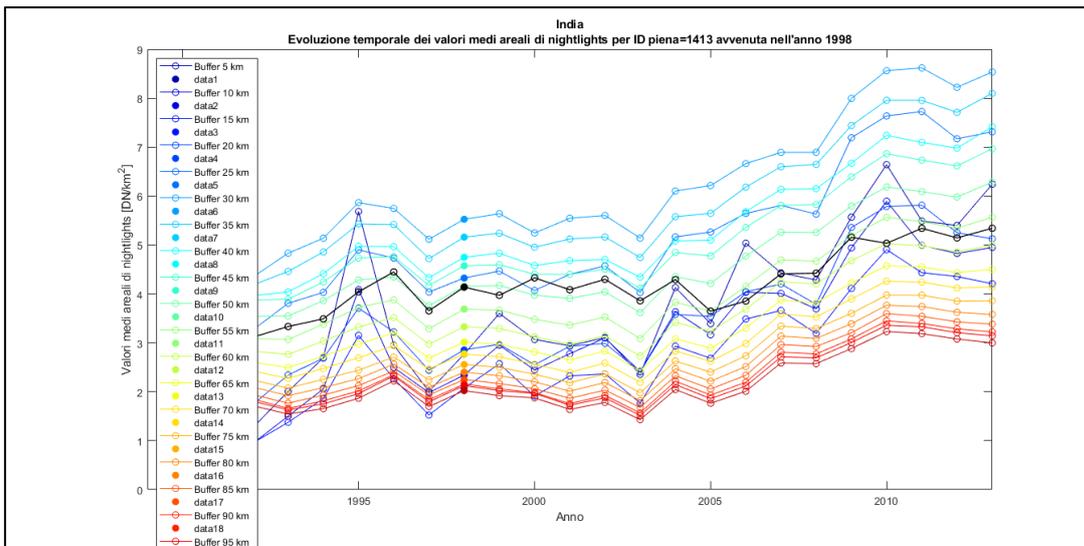


Figura 45. Evoluzione spatio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1413 avvenuto nel 1998 nella regione di Meghalaya.

Bengala Occidentale

Il Bengala Occidentale è uno Stato dell'India nord-orientale che confina ad est col Bangladesh (Figura 46).



Figura 46. Localizzazione della regione del Bengala Occidentale.

Il fiume principale che lo attraversa è il Gange che si divide in due rami: il Padma, che entra nel Bangladesh e l'Hugli-Bidyadhari che resta nel Bengala per sfociare nel Golfo omonimo. Il Gange scorre verso oriente attraversando le pianure dell'India e del Bangladesh settentrionale. Ha una lunghezza di 2510 km e le sue sorgenti sono localizzate in Uttarakhand, nel ghiacciaio di Gangotri (Himalaya centrale). La superficie del bacino a cui appartiene occupa circa 1000000 km² supportando una delle regioni più popolate della Terra (quasi la metà della popolazione indiana vive nella pianura indo-gangetica). Il principale affluente è lo Yamuna che confluisce nel Gange in Uttar Pradesh, deviando la direzione del corso d'acqua da sud-est ad est.

Il regime è torrentizio con portate variabili tra i 600 m³/s e i 5000 m³/s. Quando i fiumi Gange e Brahmaputra sono in piena, si scarica nel delta una portata di 220000 m³/s.

In questa regione si verificano tre eventi alluvionali nel periodo 1992-2013: id: 1641 nel 2000, id: 3539 nel 2009 e id: 3852 nel 2011 (Figura 47).



Figura 47. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione del Bengala Occidentale.

Relativamente alla piena con id: 1641, l'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 48):

- La tau-statistic resta stabile intorno allo zero durante l'anno successivo ed il terzo anno dopo l'evento alluvionale;
- A due e quattro anni invece è visibile una diminuzione netta, in particolare in vicinanza della piena. Allo stesso modo si nota che tra il settimo e l'ottavo anno la tau aumenta particolarmente. Osservando la figura 48 si attribuiscono questi andamenti ad una crescita di densità di luminosità notturna all'interno dei singoli buffer, ovvero ad un ripopolamento delle zone colpite dall'inondazione. Specialmente a sette/otto anni dall'evento di piena la popolazione aumenta nettamente, cioè tra il 2007 ed il 2008 perde del tutto memoria dell'evento alluvionale avvenuto nel 2000. (Figura 49).

- Per distanze di buffer maggiori di 60 km i valori tendono a ritrovare una certa stabilità.

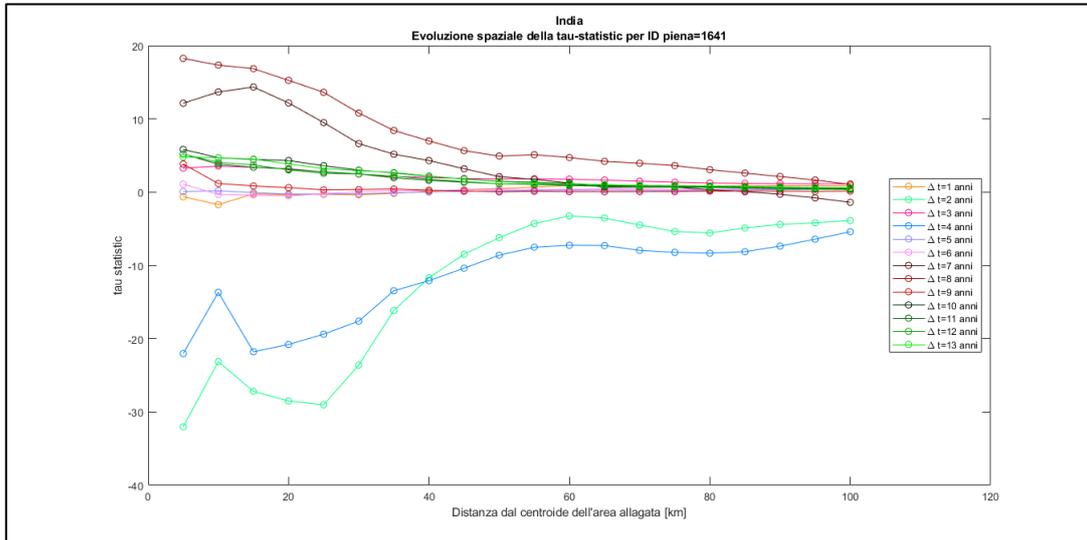


Figura 48. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1641 avvenuto nel 2000 nella regione del Bengala Occidentale.

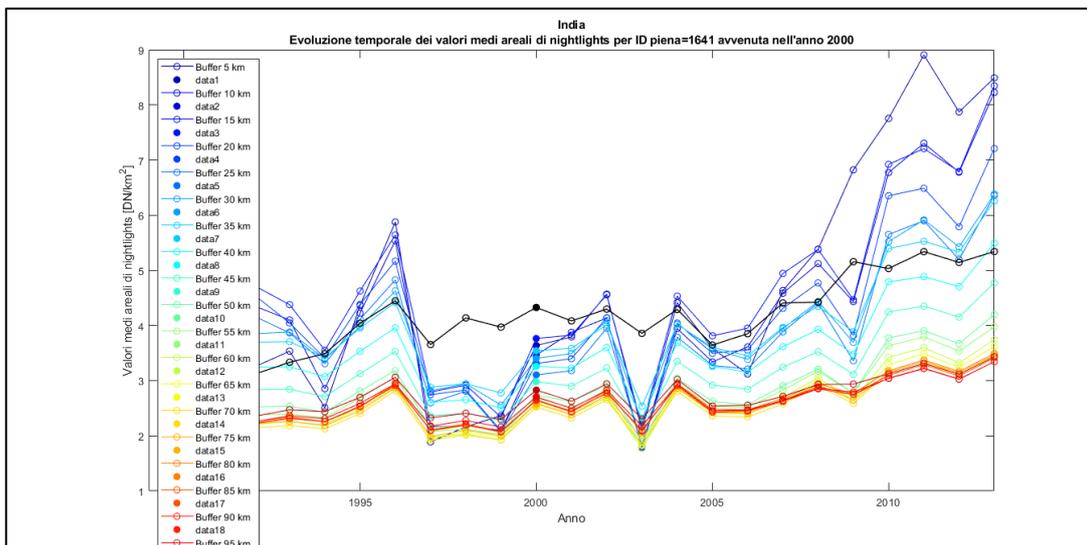


Figura 49. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale 1641 avvenuta nel 2000 nella regione del Bengala Occidentale.

L'evento alluvionale id:3539 avviene nel 2009 e presenta i seguenti andamenti dei valori di tau statistic (Figura 50).

- Il primo anno dopo l'evento alluvionale non si registra nulla di particolarmente rilevante, se non un lieve abbassamento di densità di luminosità specialmente a 5 km – 15 km dal centroide dell'evento di piena (Figura 51); in tal caso i valori di tau-statistic risultano leggermente positivi, poiché anche la densità di luminosità totale indiana è in diminuzione.
- Il secondo anno dopo l'inondazione i valori di tau-statistic sono negativi per tutti i buffer poiché, mentre la densità totale aumenta, quella locale diminuisce probabilmente in conseguenza all'evento alluvionale. Il terzo anno dopo la piena si hanno gli andamenti più variabili: per distanze di pochi chilometri dal centroide, la tau assume valori negativi ma crescenti (da -100 a distanze di 5 km, sale a -40 per distanze di 10 km): ciò è dovuto alla diminuzione di densità di luminosità totale in India tra il 2011 ed il 2012. Dai 30 ai 40 km si osserva invece un picco positivo di tau-statistic.
- Dopo il terzo anno ed oltre i 40 km si perde memoria dell'alluvione e si torna alla stabilità.

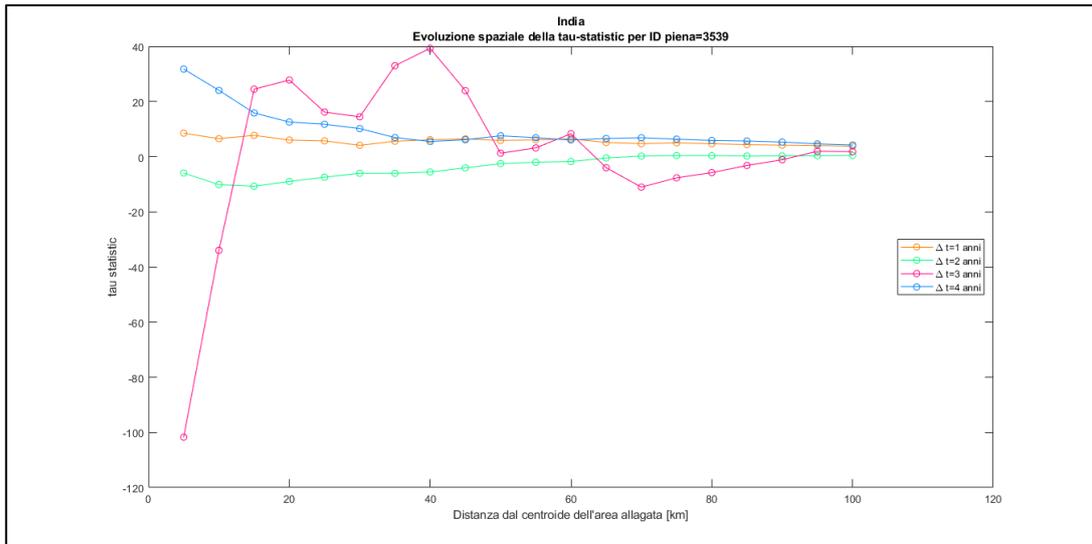


Figura 50. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3539 avvenuto nel 2009 nella regione del Bengala Occidentale

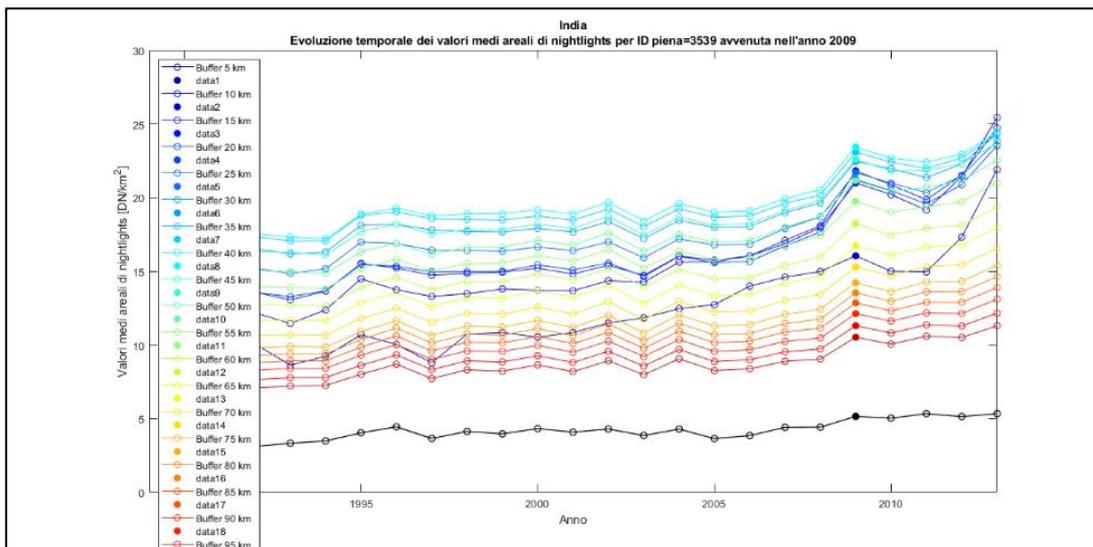


Figura 51. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3539 avvenuto nel 2009 nella regione del Bengala Occidentale.

Infine, il terzo evento alluvionale analizzato (id: 3852) si verifica nel 2011. Dall'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic, evidenziata in Figura 52, si possono osservare i seguenti comportamenti:

- Il primo anno dopo la piena non si assiste ad alcuna variazione di tau-statistic, che assume valori nulli a qualsiasi distanza di buffer.
- Due anni dopo la piena invece, si registrano dei valori di tau molto alti (a partire da circa 800), che presentano una diminuzione a 25 km di distanza di buffer, per poi aumentare nuovamente fino ai 40 km di distanza. Oltre i 40 km si riscontra una graduale diminuzione. Ciò può essere dovuto al fatto che a tali distanze dal centroide dell'area alluvionale si localizzano delle zone fluviali (tra cui la foce del Bidyadhari ed il parco nazionale di Sundabarans), costituite da aree poco popolate e quindi a bassa luminosità notturna rispetto ai buffer precedenti. Osservando il grafico relativo all'evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità (Figura 53), non si evince nessuno spostamento rilevante in conseguenza dell'evento di piena ed inoltre, si nota che già dal secondo anno un aumento di popolazione nelle zone colpite dall'inondazione.

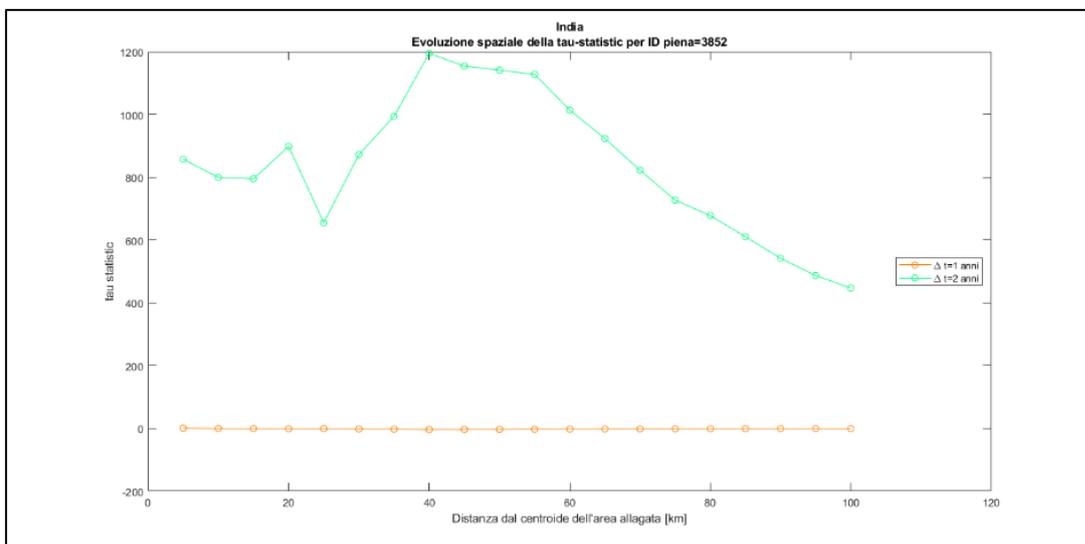


Figura 52. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3852 avvenuto nel 2011 nella regione del Bengala Occidentale.

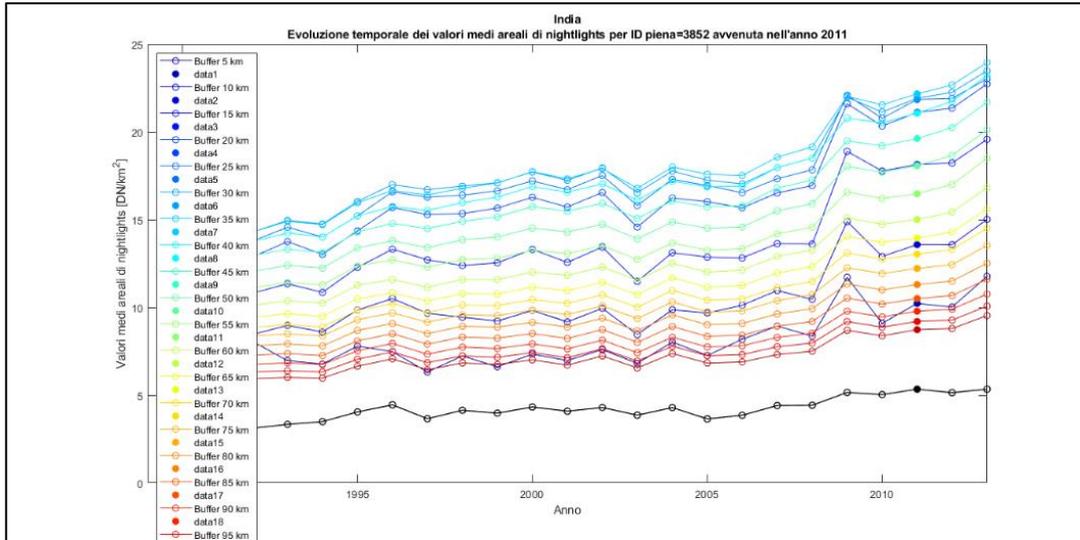


Figura 53. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3852 avvenuto nel 2011 nella regione del Bengala Occidentale.

Gujarat

Il Gujarat è una regione dell'India centro occidentale che si affaccia sul Mare Arabico; qui vivono circa 6 milioni di abitanti distribuiti su una superficie molto estesa, di quasi 120000 km² (Figura 54).

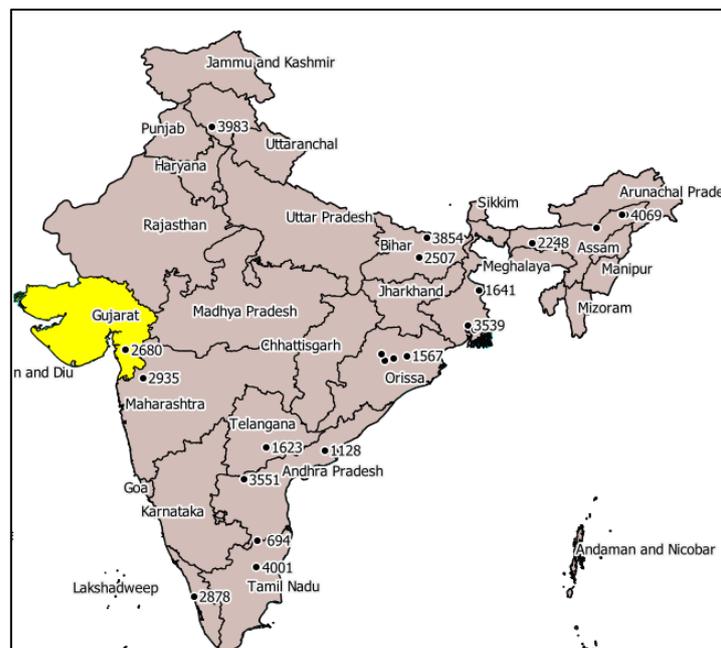


Figura 54. Localizzazione dello Stato Gujarat.

L'unico significativo evento alluvionale che ha colpito la regione (id:2680) nell'anno 2005 si è verificato nella zona valliva del Narmada (Figura 55), il settimo corso d'acqua più grande del subcontinente indiano, nonché linea di demarcazione tra Nord e Sud dell'India. È uno dei pochissimi fiumi del paese che scorre da est a ovest, per sfociare dopo 1291 km nel Mar Arabico. Attraversa il Madhya Pradesh, il Maharashtra ed il Gujarat.

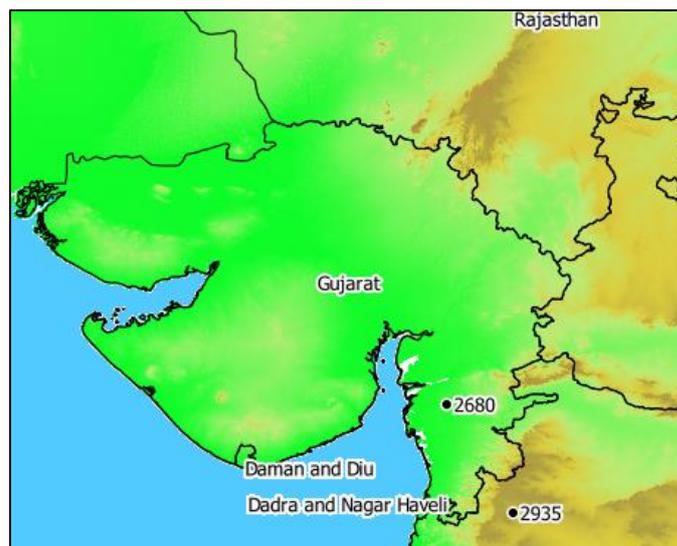


Figura 55. Localizzazione dell'evento alluvionale nella regione di Gujarat.

L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 56):

- A un anno dalla piena la popolazione si concentra a 25 km di distanza, difatti qui si evidenzia il picco massimo di tau-statistic tra il 2005 ed il 2013. Inoltre, con l'aumentare della distanza dal centroide, diminuiscono i valori di tau, specialmente oltre i 35 km. Ciò può essere spiegato dal fatto che l'area inondata è a circa 45 km dalla costa ed i pixel localizzati nelle zone marine sono descritti da densità di luce pari a zero. Pertanto, nel calcolo della sommatoria delle luci, questi valori abbassano la densità media di luminosità notturna all'interno dei buffer che li contengono (Figura 57). Per questo

motivo, lo studio di questo evento alluvionale non è da ritenersi troppo affidabile.

- Si denota una diminuzione della tau-statistic per i primi tre anni dopo la piena e specialmente nell'intorno dei 15 km, mentre oltre i tre anni, la tau aumenta in quelle stesse zone, probabilmente perché si perde memoria della piena.
- Per distanze maggiori di 35 km i valori diminuiscono per stabilizzarsi intorno a valori unitari (da 1 a 1,5); i maggiori sono previsti a quattro e sei anni dall'evento di piena, cioè nei periodi in cui si hanno i maggiori aumenti di densità di luminosità locale nei buffer (Figura 57).

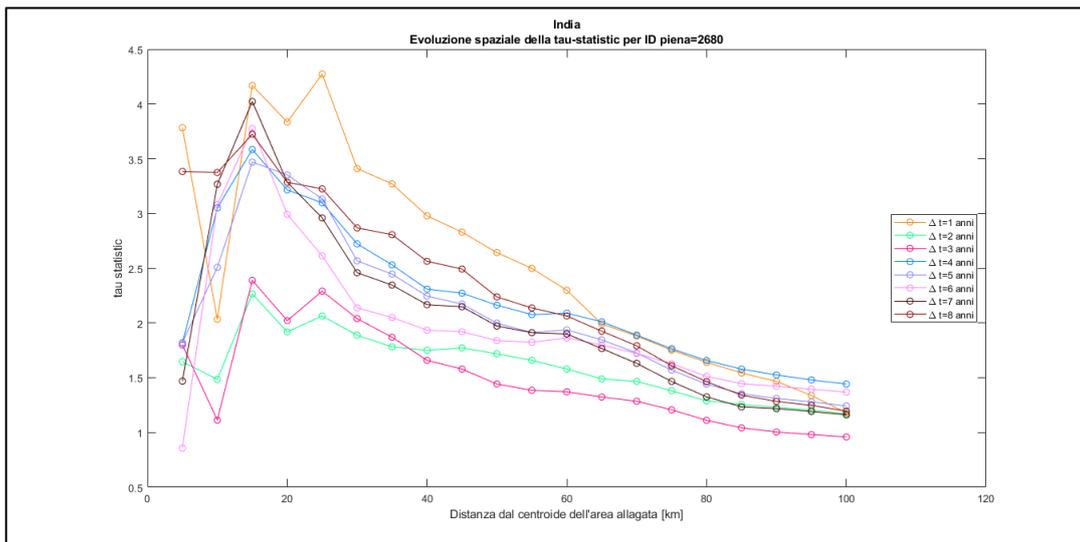


Figura 56. Evoluzione spatio-temporale delle tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2680 avvenuto nel 2005 nella regione di Gujarat.

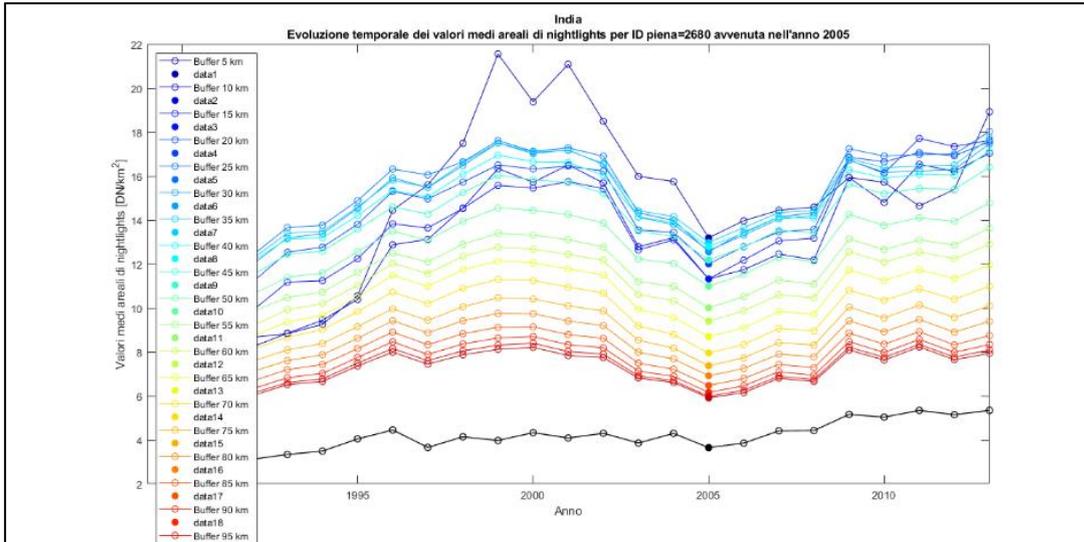


Figura 57. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2680 avvenuto nel 2005 nella regione di Gujarat

Maharashtra

Il Maharashtra è una regione dell'India centro-occidentale, seconda per estensione e numero di abitanti, dopo il Rajasthan (Figura 58).

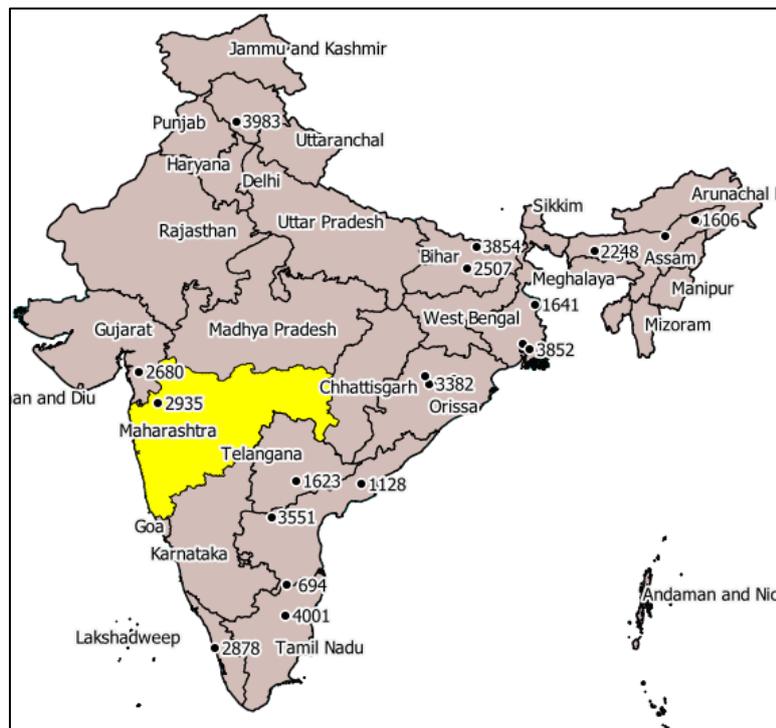


Figura 58. Localizzazione della regione di Maharashtra.

Il territorio è bagnato a ovest dal Mar Arabico, dove peraltro si affaccia la capitale Mumbai, ed è pianeggiante sulla costa ma lambito all'interno dal Ghati occidentale. Da queste vette scendono i fiumi della regione, che solcano l'altopiano del Deccan, attraversando altre regioni e sfociando nel Golfo del Bengala. Il Godavari è il principale corso d'acqua che nasce in Maharashtra e poi si riversa nel Telengana e nell'Andhra Pradesh.

Nel 2006 si verifica un evento di piena in una zona montuosa settentrionale del Maharashtra di severità pari a 2 (Figura 59).

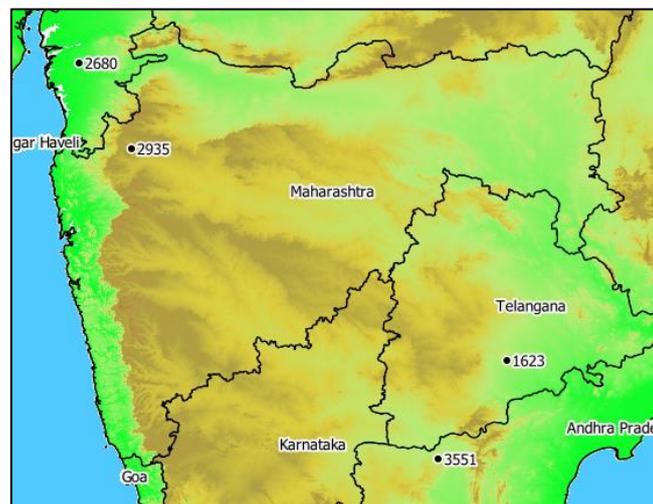


Figura 59. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Maharashtra.

La figura 60 riporta l'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic, che mostra i seguenti andamenti:

- Durante i primi due anni si manifesta un abbassamento della tau-statistic fino ai 15 km di distanza dal centroide. Successivamente, i valori subiscono un aumento e raggiungono il picco massimo a circa 30 km di distanza.
- Negli anni seguenti il massimo tende ad essere raggiunto a distanze minori, evidentemente perché man mano la popolazione perde memoria dell'evento alluvionale e si ristabilisce nelle zone colpite dal disastro. Infatti, negli ultimi

anni (2011-2013), è evidente un aumento di densità di luminosità anche nelle zone vicine al centroide (Figura 61).

- Oltre i 40 km i valori di tau si stabilizzano.

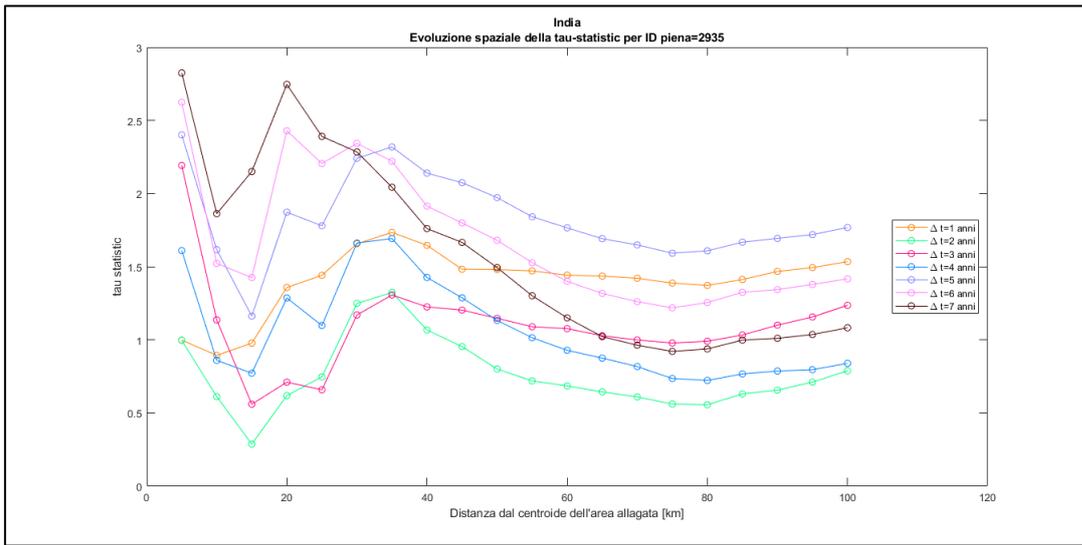


Figura 60. Evoluzione spaziale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2935 avvenuto nel 2006 nella regione di Maharashtra.

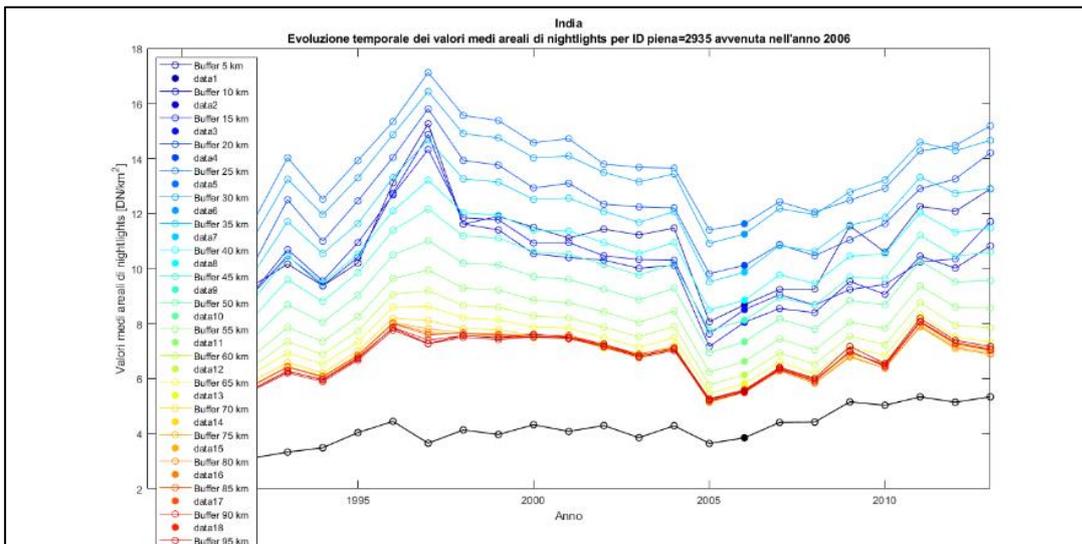


Figura 61. Evoluzione spaziale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2935 avvenuta nel 2006 nella regione di Maharashtra.

Orissa

Orissa è sul margine orientale indiano ed è chiamata “terra dei disastri” (Figura 62).

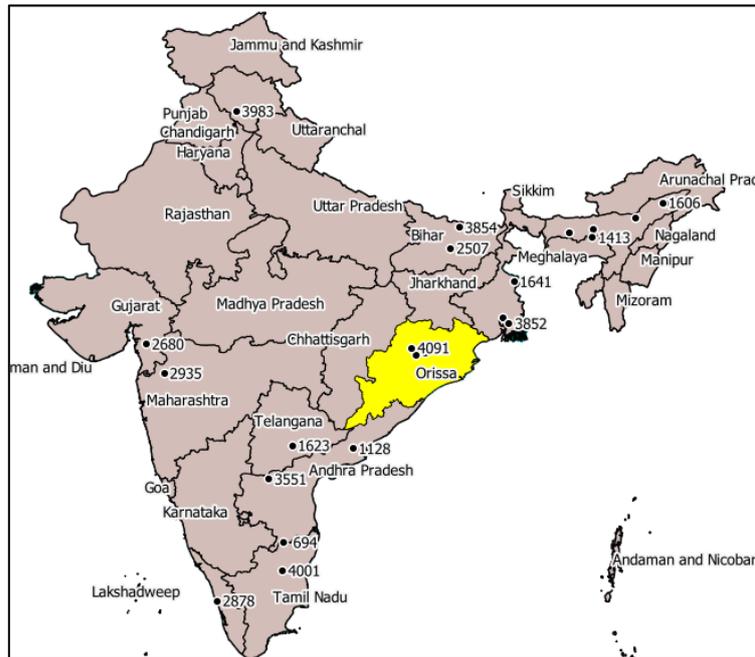


Figura 62. Localizzazione della regione di Orissa.

La regione del Mahanadi, ovvero quella attraversata dall’omonimo fiume, è la più colpita per la presenza di quest’ultimo che, a causa delle frequenti ed intense piogge, tende a straripare abbastanza regolarmente. Esso scorre per 858 km ed il suo flusso è laminato sin dagli anni 50 dalla diga di Hirakud, a ridosso dell’omonimo lago. È la diga più grande dell’India e una delle quattro più grandi del mondo. Oltre a regolare il flusso, offre acqua per vari usi, specialmente industriale ed idroelettrico (Beura, 2018).

Gli eventi alluvionali considerati sono id:1567, dovuto al celebre super ciclone del 1999, id:1741 nel 2001, id:3382 nel 2003 e id:4091 nel 2013 (Figura 63). Quest’ultimo evento non verrà analizzato in quanto, non disponendo di dati successivi al 2013, non è possibile studiare l’andamento della tau-statistic.

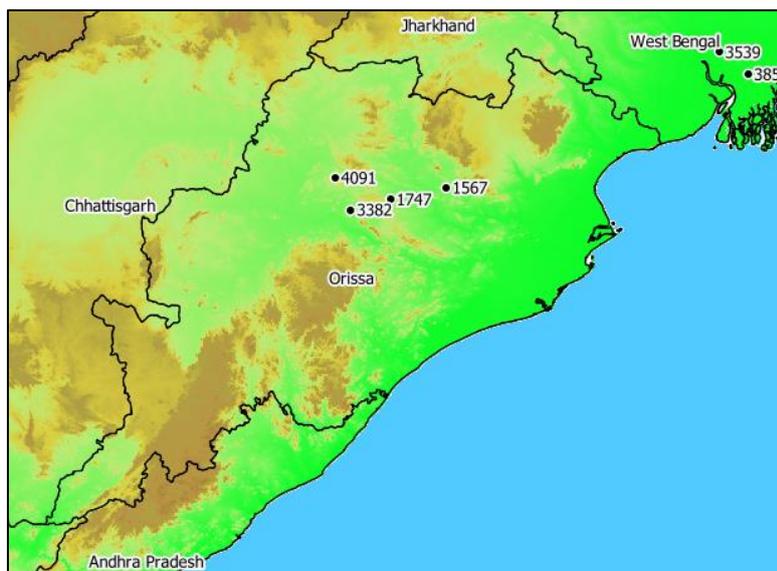


Figura 63. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Orissa.

L'evento con id: 1567 corrisponde ad una piena avvenuta nel 1999 a causa del ciclone tropicale che si è abbattuto nell'Oceano Indiano settentrionale. Si tratta del fenomeno più intenso e tra i più distruttivi della regione. La tempesta si è sviluppata a partire dal 25 ottobre ed è durata una decina di giorni, raggiungendo il culmine il 29 ottobre con venti di 260 chilometri orari e una pressione record di 912 mbar (Odisha Cyclone 1999, s.d.). Quello stesso giorno l'evento estremo raggiunse la terra ferma a Orissa, colpendo in seguito il Myanmar e il Bangladesh, generando inondazioni dal mare fino a 35 km nell'entroterra, forti venti e piogge torrenziali. L'ondata di devastazione produsse danni a più di un milione e mezzo di edifici, ruppe più di due mila argini che causarono innumerevoli inondazioni. L'evento analizzato nel presente elaborato durò 14 giorni e provocò la perdita di quasi diecimila vite. L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 64):

- Il primo anno successivo all'inondazione non si rilevano andamenti di particolare interesse; tuttavia si registra un massimo assoluto a 45 km due anni dopo la piena ma poi il picco decresce e torna a stabilizzarsi, probabilmente a causa dell'inondazione 1747.

- Negli anni seguenti la tau-statistic continua ad avere andamenti oscillanti intorno allo zero, con un'eccezione per l'anno 2006, cioè a 7 anni dall'evento alluvionale. Si registra prima una diminuzione delle tau (Figura 64) e poi un aumento di tau-statistic dai 25 km ai 35 km di distanza di buffer, ma sempre mantenendo valori negativi; ciò si può attribuire al calo delle luminosità totali in India che si verifica rispetto al 1999, anno in cui si verifica l'evento (Figura 65).
- A distanze maggiori si raggiunge una sorta di stabilità, sempre ad eccezione del settimo anno, in cui la tau-statistic continua ad assumere valori negativi anche a distanze di buffer di 100 km (-4,5); ciò accade perché in quell'anno, rispetto al 1999, si manifesta un aumento di densità locale ed una diminuzione di densità totale per qualsiasi distanza considerata (Figura 65).

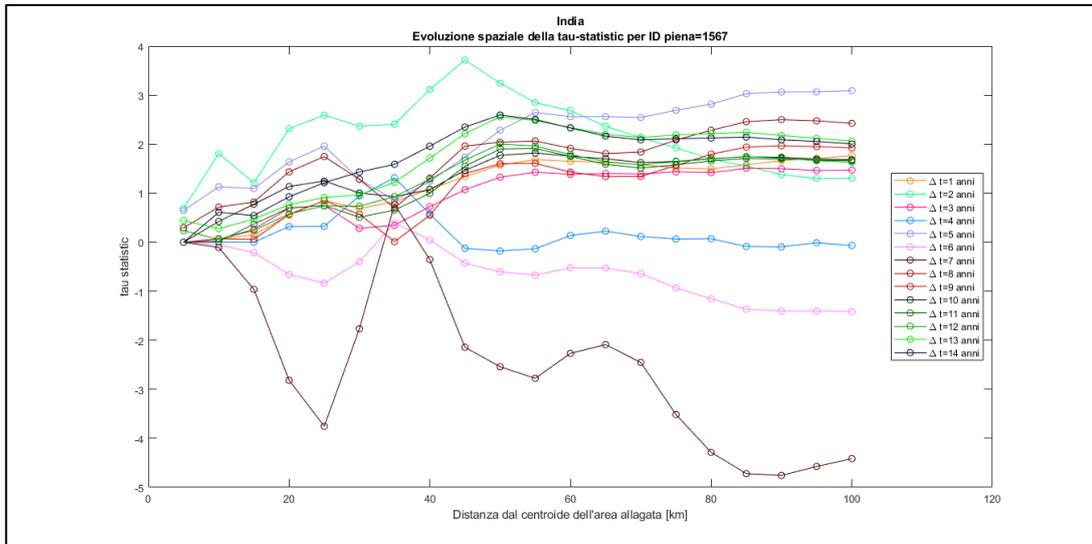


Figura 64. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1567 avvenuto nel 1999 nella regione di Orissa.

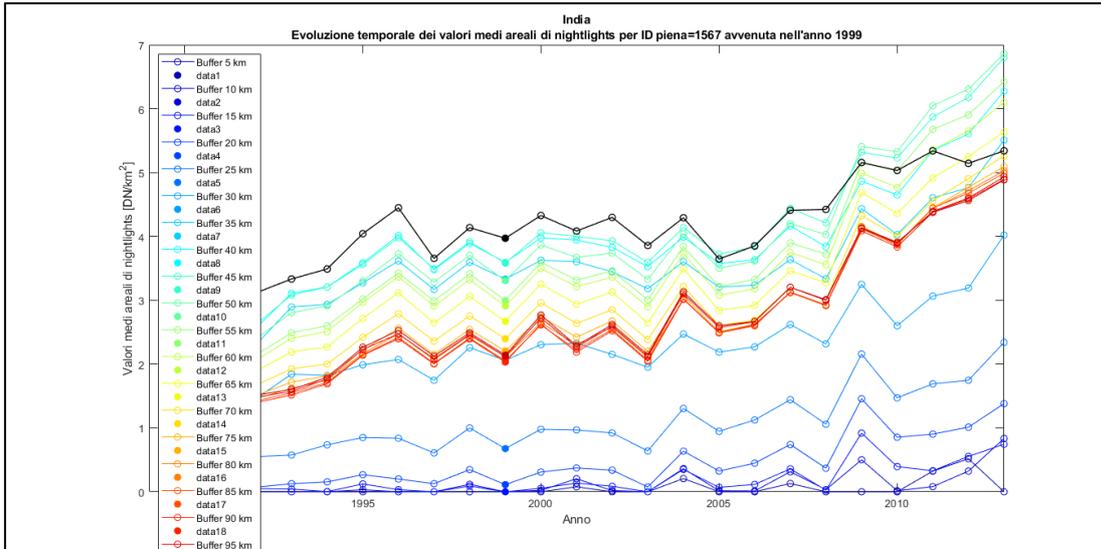


Figura 65. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1567 avvenuto nel 1999 nella regione di Orissa.

Un altro evento alluvionale analizzato (id:1741) è quello il cui centroide è localizzato a circa 55 km dal precedente nel 2001 (id:1567). L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic riportata in Figura 66 evidenzia i seguenti comportamenti:

- Dopo un anno dall'evento alluvionale c'è una diminuzione della tau-statistic fino a 45 km di distanza di buffer; dopo 3 anni invece si registra un picco a 10-15 km (ripopolamento della zona). Dunque, la popolazione sembra aver perso memoria dell'evento estremo.
- In realtà, si presenta un ulteriore minimo a quattro e cinque anni; in questo caso però, la tau-statistic assume valori negativi perché si ha una diminuzione di popolazione totale in India (Figura 66). Anche tra gli 11 e i 12 anni dopo la piena c'è un picco a 30 km circa, forse dovuto alla piena 3382 del 2008, la cui area di influenza dista circa 60 km dal centroide in questione. Ad esempio, potremmo ipotizzare che in seguito a quell'evento la popolazione abbia provveduto a spostarsi da quell'area insediandosi in zone più vicine all'area inondata nel 2001, avvenimento di cui ormai aveva perso memoria.
- Per distanze di buffer maggiori (oltre i 60 km), si assiste ad una sostanziale stabilizzazione dei risultati su valori variabili tra 0 e 2. I maggiori

corrispondono a quelli relativi al terzo anno successivo all'evento alluvionale (2004), infatti dalla Figura 67 si osserva come in quel periodo aumentino nettamente sia la densità locale che quella totale in India.

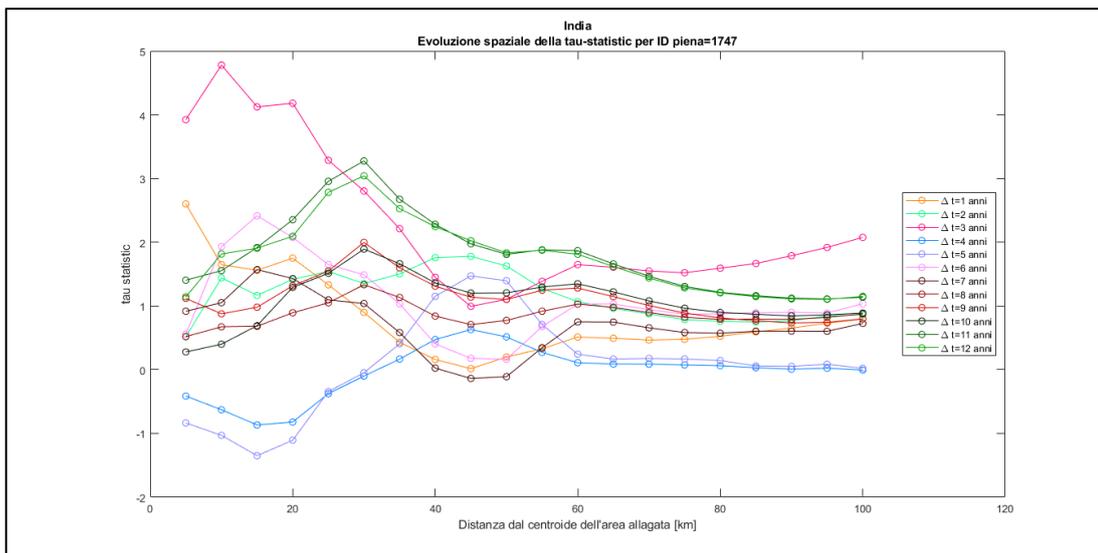


Figura 66. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1747 avvenuto nel 2001 nella regione di Orissa.

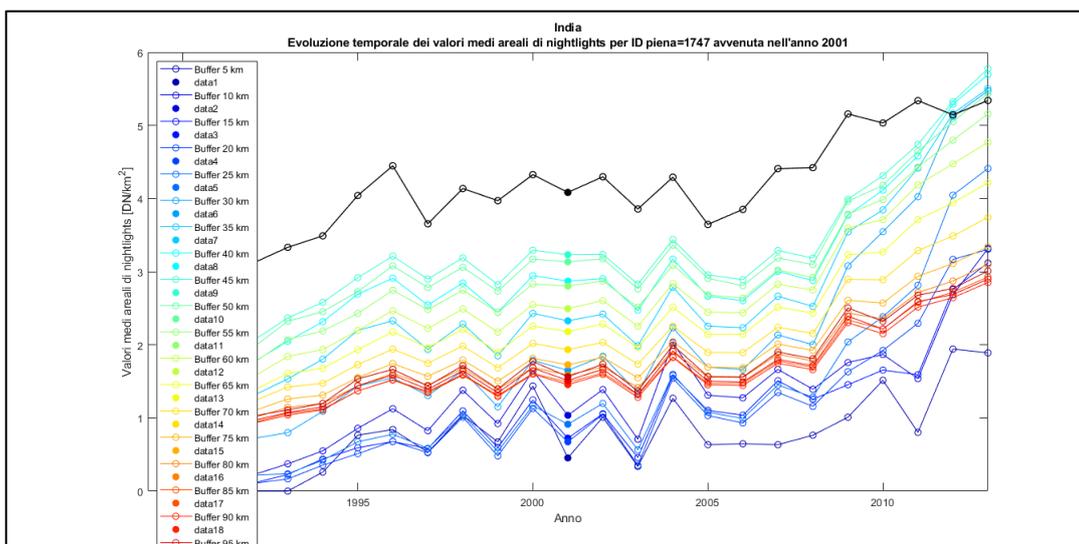


Figura 67. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1747 avvenuto nel 2001 nella regione di Orissa.

Un altro evento alluvionale analizzato è quello che risponde a id: 3382 verificatosi nel 2008. In Figura 68 si riporta l'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic che mostra le seguenti peculiarità:

- Durante i primi due anni successivi alla piena si manifestano dei piccoli aumenti di tau-statistic nell'intorno dei 20 km dal centroide; osservando la figura 68 si osserva come questo derivi sia da un aumento locale che globale della luminosità.
- Dal terzo anno in poi si evidenziano picchi di tau a circa 15 km di distanza di buffer per tutti gli anni seguenti, dovuti in particolar modo al fatto che aumenta la popolazione indiana subisca un aumento netto dal 2008 al 2013.
- Per distanze maggiori a 20 km si assiste ad una lieve diminuzione di tau per medie distanze di buffer, probabilmente una conseguenza dell'evento estremo che si verifica nel 2013 in una zona forestale che dista circa 40 km. Per questa inondazione (id: 4091) purtroppo non è possibile analizzare alcun dato. Oltre i 55 km di distanza di buffer, invece, si osservano dei nuovi picchi (fino ad un massimo di tau-statistic pari a 1,4) a causa di aumenti locali e generali di densità (Figura 69).

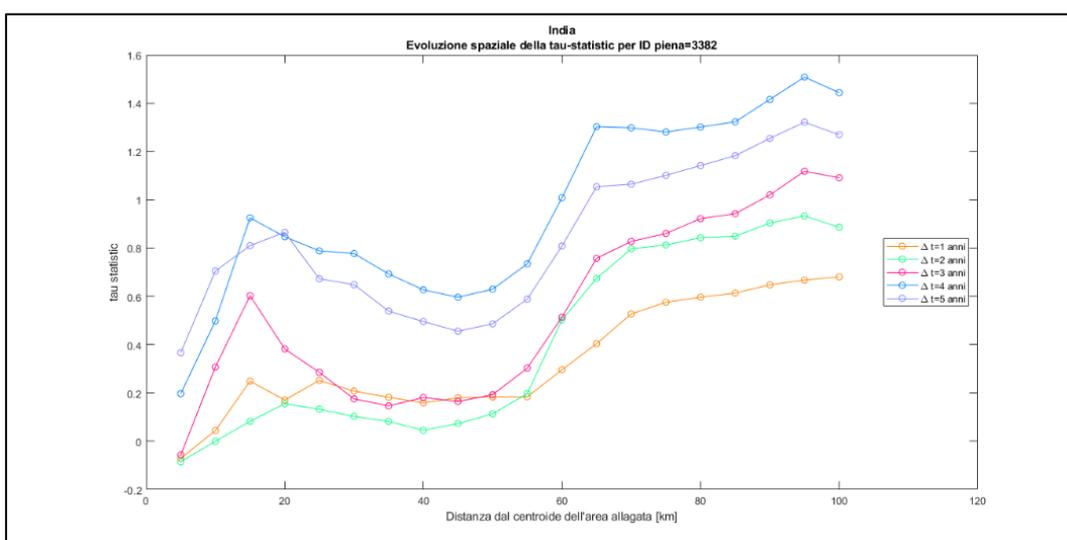


Figura 68. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3382 avvenuto nel 2008 nella regione di Orissa.

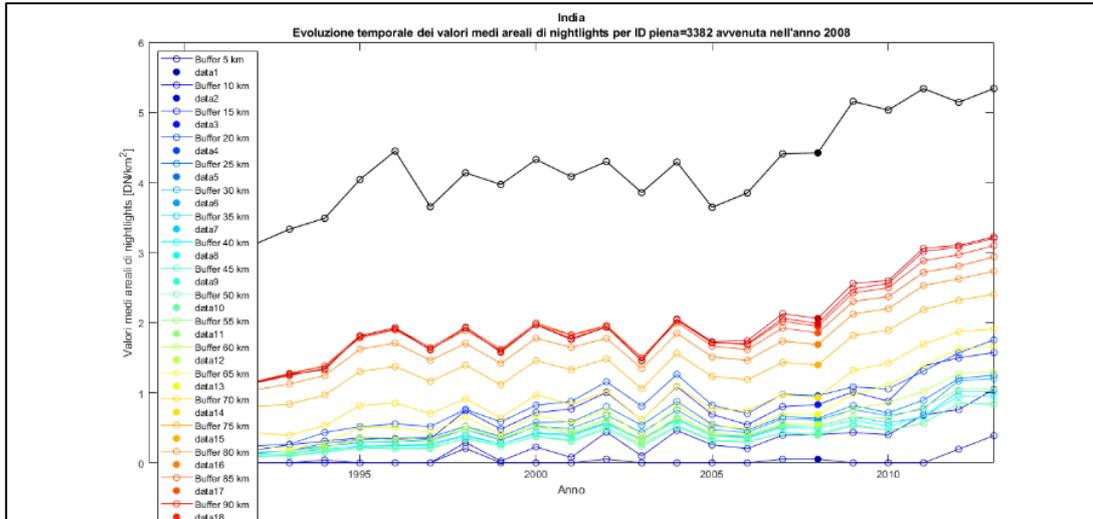


Figura 69. Evoluzione spatio-temporale dei valori medio areali della luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3382 avvenuto nel 2008 nella regione di Orissa.

Telangana

È una regione situata nell'entroterra centrale dell'India che si è costituita in forma ufficiale nel 2014 in seguito alla separazione dell'Andhra Pradesh (Figura 70).

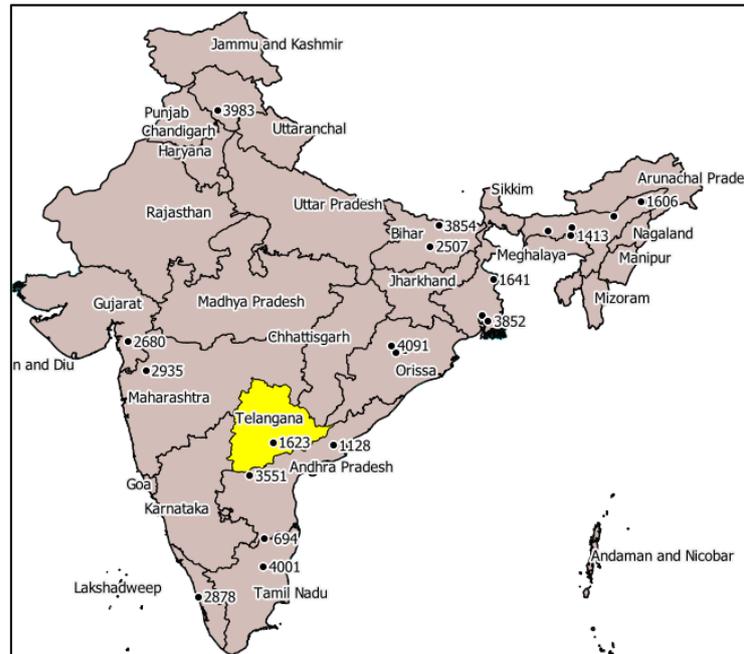


Figura 70. Localizzazione dello Stato Telangana.

Nel 2000 si verifica un evento alluvionale significativo (Figura 71), causato da una breve ma intensa pioggia torrenziale.

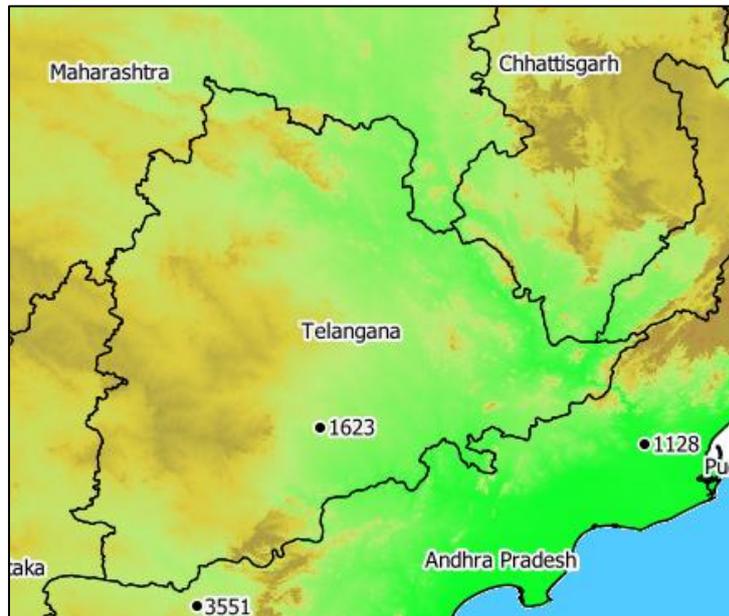


Figura 71. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Telangana.

In Figura 72 è riportata l'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic, che evidenzia i seguenti andamenti:

- Mentre ad un anno dalla piena non vi sono andamenti di interesse, a due anni la tau-statistic mostra un picco a 10 km di distanza di buffer. Osservando la figura 73, si osserva che il denominatore della tau presenta valori negativi (la densità delle luci nel 2002 è minore che nel 2000), il numeratore invece è negativo per piccoli buffer e positivo all'aumentare della distanza.
- A quattro anni dall'evento estremo la situazione è molto simile alla precedente: il denominatore è nuovamente negativo ed il numeratore assume valori positivi solo per buffer che contengono grandi distanze, per cui si notano degli aumenti di densità locale dalla figura 73.

A sette anni dall'inondazione il denominatore è positivo, così come il numeratore, infatti ormai sembra si sia persa memoria della piena e che quindi le zone tendano a ripopolarsi. L'aumento appare più spiccato a grandi distanze che perciò si ripopolano con più rapidità di quelle nelle vicinanze del centroide.

- Per distanze maggiori di 30 km, si riscontrano dei valori negativi di tau-statistic a due e quattro anni dalla piena: in realtà è la popolazione totale in India che è in calo, mentre quella locale nei buffer aumenta rispetto all'anno in cui avviene l'evento alluvionale.

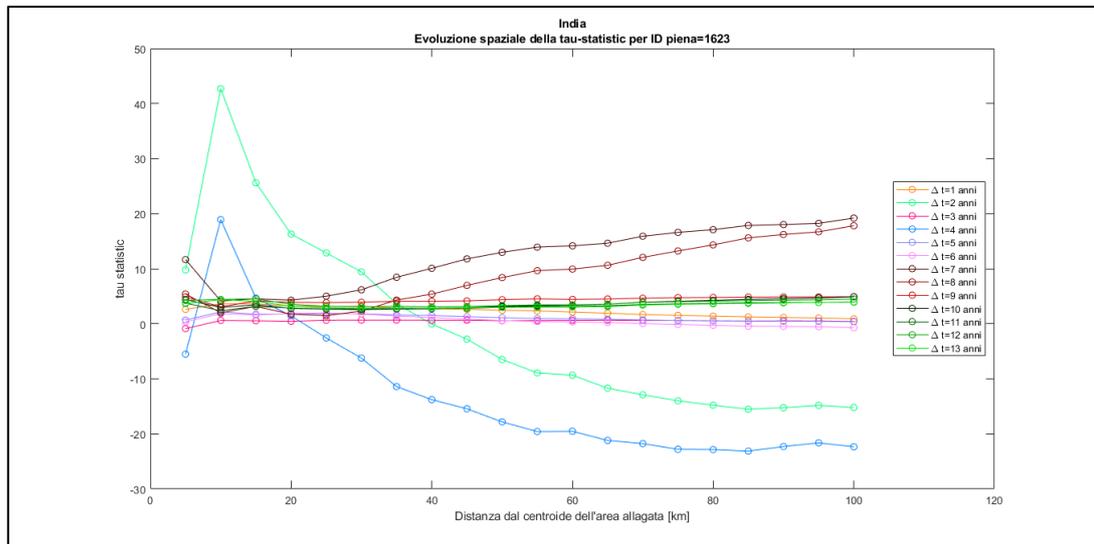


Figura 72. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1623 avvenuto nel 2000 nella regione di Telangana.

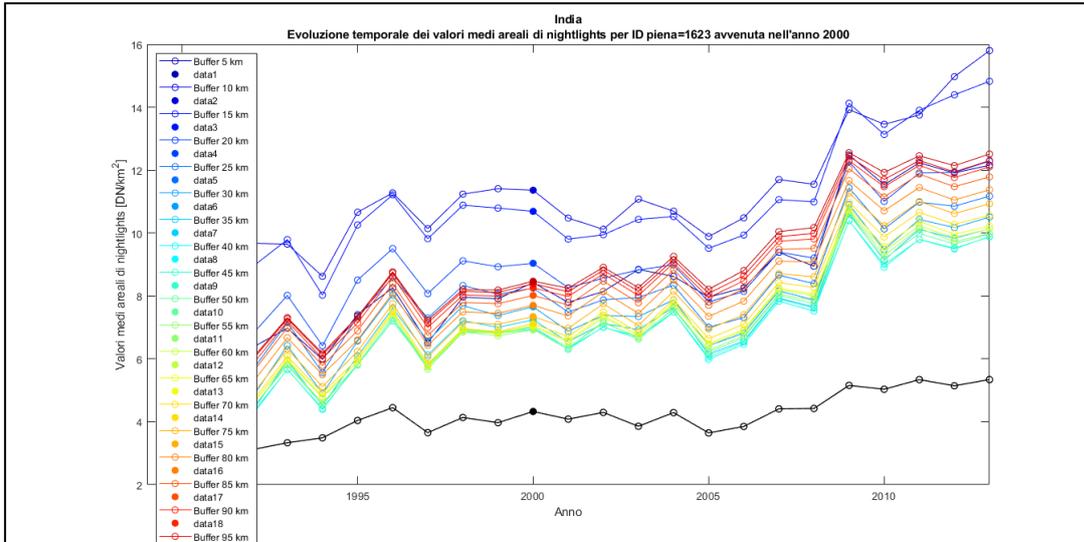


Figura 73. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1623 avvenuto nel 2000 nella regione di Telangana.

Andhra Pradesh

L'Andhra Pradesh è una vasta regione dell'India centro-orientale che si affaccia sul Golfo del Bengala (Figura 74).

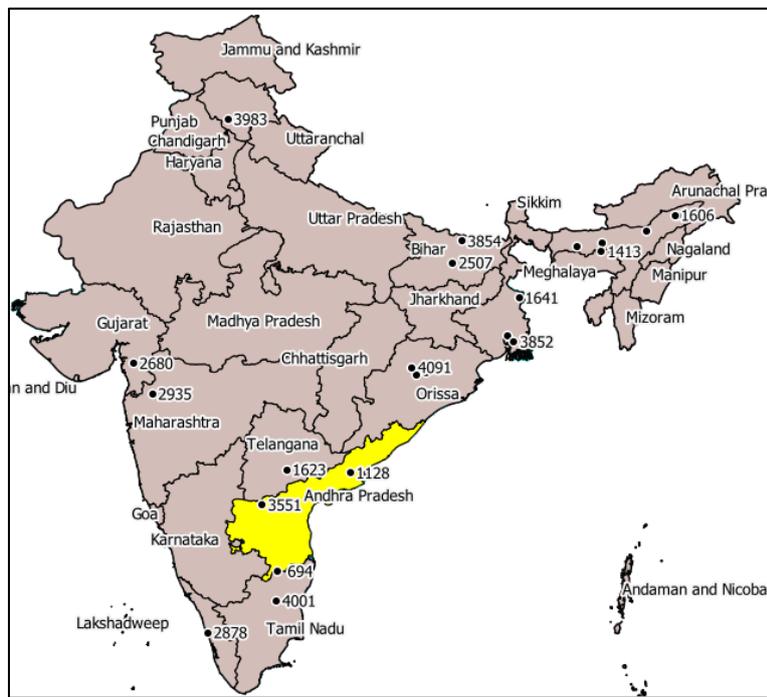


Figura 74. Localizzazione dello Stato Andhra Pradesh.

A livello idrografico presenta un grande fiume molto frequentato perché sacro agli induisti, il Godavari. Il corso d'acqua scorre per 1465 km, nella stessa direzione del Krishna e attraversa ben 3 stati, Andhra Pradesh, Telengana e Maharashtra.

Nel 2019 la zona è teatro di una terribile inondazione che costringe allo sfollamento più di 74 mila persone, circa 50 mila provenienti dal versante orientale del Godavari e 20 mila dall'occidentale. Il livello dell'acqua ha sfiorato i 29 metri nei pressi della diga di Polavaram, costringendo gli abitanti di alcuni villaggi a vivere cinque giorni in assenza di acqua e vie di comunicazione (Amravati, 2019).

Le zone sono parecchio popolate, soprattutto nella regione del delta, con una media di 18 persone per chilometro quadrato, con alcune aree localizzate in cui si raggiungono valori di 36,5 abitanti/km² (Coleman & Huh, 2002).

In Andhra Pradesh si riscontrano due eventi alluvionali di interesse: il primo (id: 1128) avvenuto nel 1996 e localizzato nella zona orientale del Godavari, il cui centroide ricade nei pressi del Godavari Arch Bridge, nella località di Rajahmundry; il secondo, (id: 3551) situato a sud-ovest dalla prima, il cui centroide è posto a qualche decina di chilometri dal corso del Tungabhadra, il principale affluente del fiume Krishna. La prima alluvione è durata solo quattro giorni ma ha avuto effetti molto più devastanti della seconda, avvenuta nel 2009 (Figura 75).

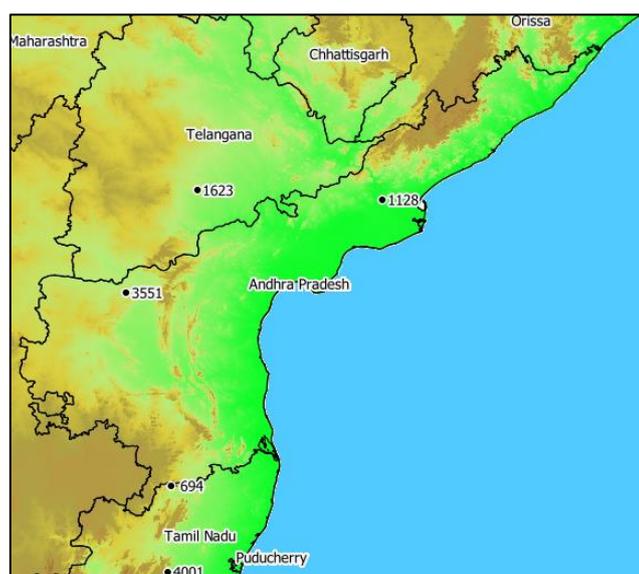


Figura 75. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Andhra Pradesh.

Relativamente all'evento alluvionale del 1996 (id:1128), l'evoluzione spaziotemporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 76):

- Nei primi due anni successivi alla piena non si nota nulla di rilevante, infatti la tau-statistic rimane all'incirca stabile su valori nulli. Per il terzo anno si evidenziano dei valori leggermente più elevati di tau-statistic, specialmente per il buffer a 5 km dal centroide, attribuibili ad un lieve aumento di densità locale.
- A otto anni dall'evento di piena si avrà un valore negativo di tau-statistic specialmente nelle vicinanze del centroide (fino a 25 km) poiché, mentre il denominatore è negativo (nel 2004 la densità in India è in diminuzione rispetto al 1996), il numeratore è positivo, poiché la densità nell'intorno della piena è in aumento (Figura 77). Negli anni 2007-2008, cioè dopo undici e dodici anni dall'evento estremo, ci troviamo di fronte ad un decremento ancora più netto di tau. Il motivo potrebbe essere che in quegli anni si verificano una serie di inondazioni importanti del Godavarin, che non sono state considerate perché catalogate nel Flood Archive con grado di severità pari ad 1, nonostante abbiano mietuto un consistente numero di vittime. Negli anni seguenti la popolazione torna ad assestarsi ai livelli precedenti al 2008.
- Oltre i 20 km di distanza di buffer i valori di tau-statistic tendono ad assestarsi attorno allo zero, ad eccezione del biennio 2007-2008 in cui si manifestano ancora valori negativi di tau-statistic, anche se in crescita rispetto a distanze di buffer minori. Ciò accade perché l'aumento di densità di luminosità locale, rispetto all'anno in cui si è verificata la piena, tende a diminuire all'aumentare della distanza di buffer.

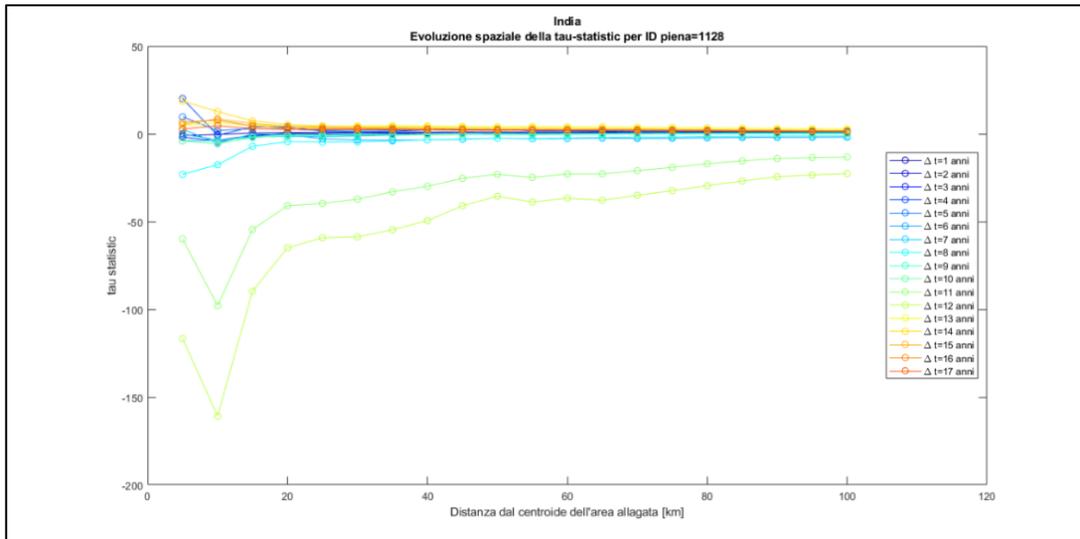


Figura 76. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1128 avvenuto nel 1996 nella regione di Andhra Pradesh.

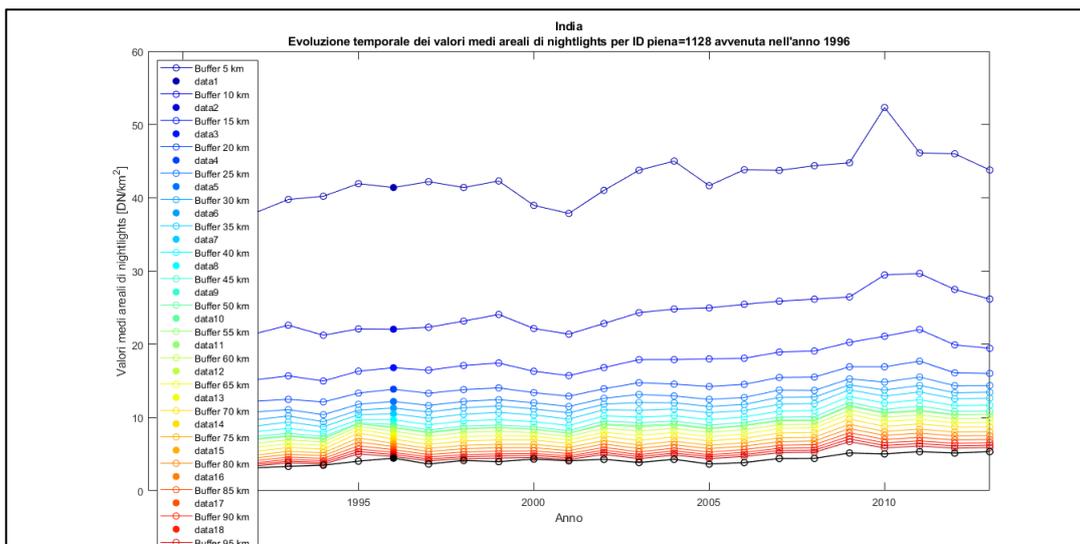


Figura 77. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1128 avvenuto nel 1996 nella regione di Andhra Pradesh.

Il secondo evento alluvionale considerato nella regione dell' Andhra Pradesh si verifica nel 2009 e dura 17 giorni (id: 3551).

Gli andamenti spazio-temporali della tau-statistic mostrano questi andamenti (Figura 78):

- Il primo anno dopo l'evento di piena si ha una riduzione dei valori di tau-statistic allontanandosi dal centroide della piena. Dal valore di 9,34 (a 5 km), si riducono gradualmente fino a raggiungere lo zero per una distanza di buffer di circa 40 km. Il valore risulta positivo perché sia il denominatore che il numeratore della funzione assumono segno negativo (sono in diminuzione le densità di luminosità sia nei buffer che nell'intero Paese). Anche il secondo anno successivo all'evento mostra andamenti simili, ma stavolta dovuti ad un aumento di densità di luminosità sia nei buffer che in India. Nel 2012 (il terzo anno successivo alla piena) si verifica un aumento di tau-statistic soprattutto nell'immediata vicinanza del centroide. Il picco viene raggiunto a 15 km di distanza di buffer, con un valore di tau-statistic di circa 92. Anche in questo caso i dati sono fuorvianti, perché come si evince osservando la Figura 79, sia la densità di luminosità locale che quella totale indiana sono in diminuzione rispetto al 2009. Inoltre, la tau è molto più imponente degli altri anni perché il numeratore assume un valore assoluto parecchio maggiore rispetto a quello assunto dal denominatore.

Al quarto anno i valori si riassessano sullo zero.

- Per grandi distanze di buffer (oltre i 40 km) la tau-statistic tende a stabilizzarsi, ad eccezione del terzo anno successivo alla piena (2012), in cui si mantengono valori di tau positivi (circa 43,9 a 100 km di distanza dal centroide) per gli stessi motivi già descritti precedentemente.

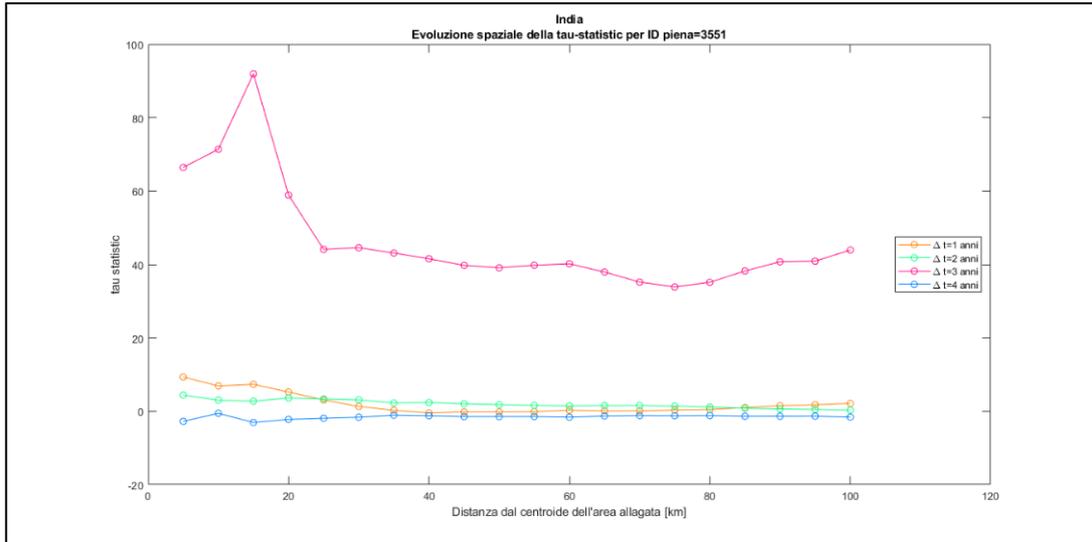


Figura 78. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3551 avvenuto nel 2009 nella regione di Andhra Pradesh.

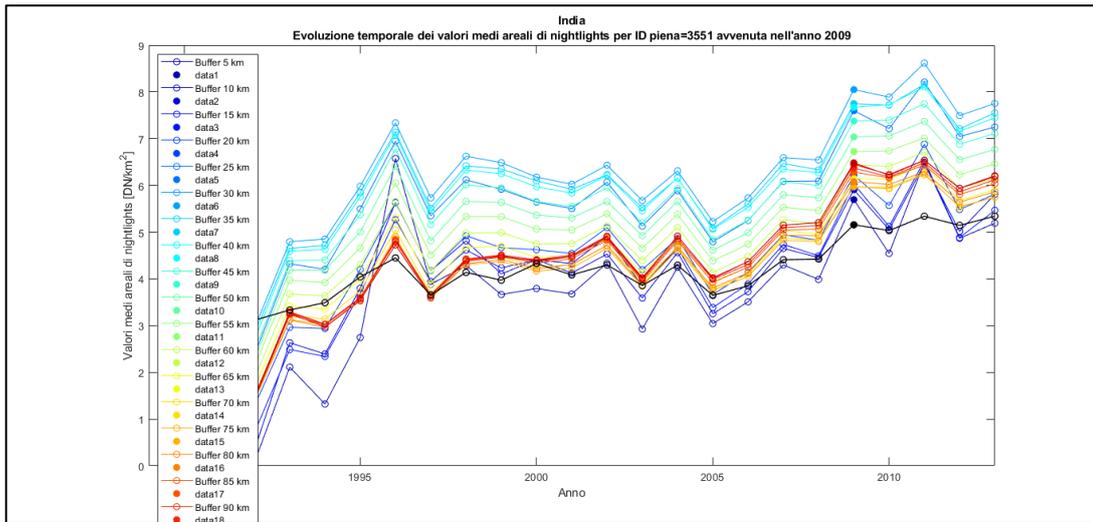


Figura 79. Evoluzione spatio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3551 avvenuto nel 2009 nella regione di Andhra Pradesh.

Tamil Nadu

La regione del Tamil Nadu si trova nella zona meridionale della penisola indiana, lungo la costa orientale, che è quella più a rischio per i disastri naturali (Figura 80).

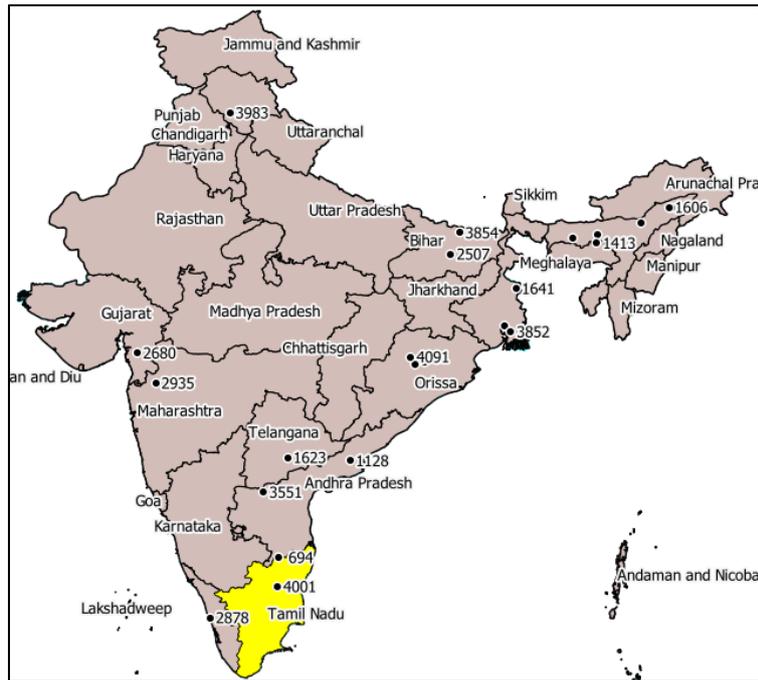


Figura 80. Localizzazione della regione di Tamil Nadu.

Ricopre un'area di 120 km² con una linea di costa lunga 1076 km (circa il 15% della linea di costa totale). In questa zona sono presenti ben 591 villaggi esposti ai cicloni tropicali. La regione del Tamil Nadu è soggetta ad eventi alluvionali ogni anno: migliaia di persone, a causa delle precipitazioni legate al monsone nord-orientale, perdono la loro casa e le loro colture.

Gli eventi di piena che hanno caratterizzato questa zona nel periodo di studio sono due: id: 694 avvenuto nel 1992 e id: 4001 registrato nel 2012 (Figura 81).

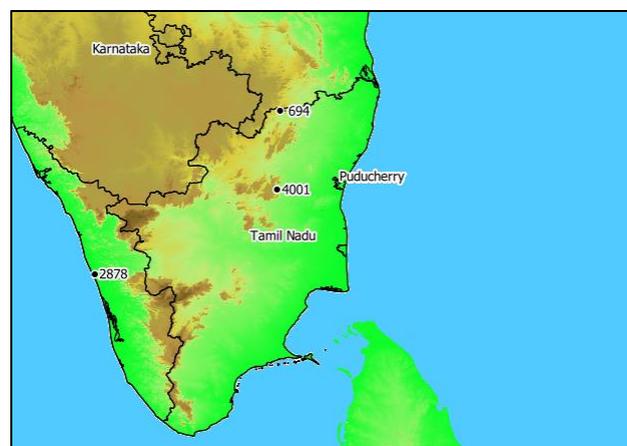


Figura 81. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Tamil Nadu.

Relativamente all'evento alluvionale id: 694 avvenuto nel 1992, l'evoluzione spaziotemporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 82):

- Per il primo anno dopo l'evento alluvionale (1993) è visibile un incremento graduale di tau-statistic per piccole distanze di buffer (fino a circa 25 km); nell'anno successivo, la tau-statistic subisce invece una diminuzione, tanto da assumere valori negativi nei pressi del centroide dell'area inondata. Osservando la figura 82 si può notare che il valore medio areale di luminosità totale è minimo nel 1992, infatti la densità di luminosità in India relativa a ciascun anno è sempre in crescita se confrontata con quella del 1992. Dunque, quando la tau-statistic è negativa è sempre dovuto al numeratore e cioè ad una dislocazione della popolazione. Quando invece la tau-statistic è positiva, vorrà dire che sarà positivo anche il numeratore della funzione e quindi che la densità di popolazione nel buffer considerato è in aumento rispetto all'anno dell'alluvione. Applicando questo concetto ai risultati evidenziati dalla figura 82, si deduce che la popolazione risulta in aumento per tutto il primo anno successivo all'alluvione, mentre sembra diminuire nell'anno 1993 nelle zone del centroide.
- Durante gli anni successivi si nota il massimo incremento di tau-statistic a circa sette anni dall'evento alluvionale: da quel momento in poi la popolazione sembra perdere memoria della piena avvenuta e tende a ristabilirsi nelle zone colpite dal fenomeno estremo.
- A distanze di buffer maggiori di 40 km si osserva una stabilizzazione generale della tau-statistic, ma continua ad evidenziarsi un aumento particolare nel 1993. Dagli andamenti delle densità (Figura 83) si deduce che gli effetti della piena non colpiscono subito la popolazione, che tende a spostarsi dalle zone colpite con un anno di ritardo. Questo può dipendere dal fatto che l'evento avviene a cavallo tra ottobre e novembre, perciò le risposte della popolazione potrebbero essere ritardate rispetto a quelle relative agli altri eventi di piena che generalmente si verificano tra giugno e settembre.

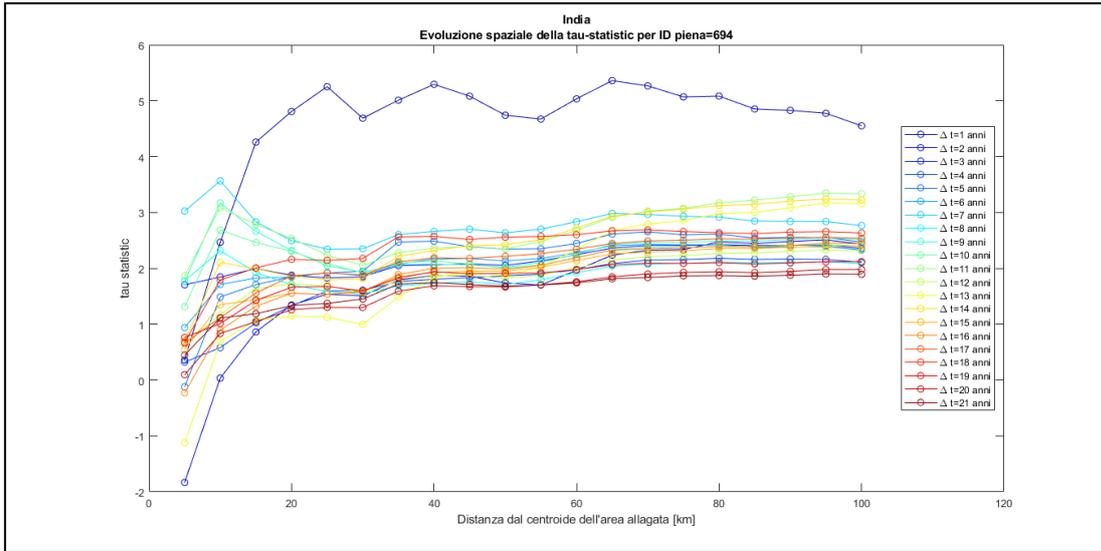


Figura 82. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:694 avvenuto nel 1992 nella regione di Tamil Nadu.

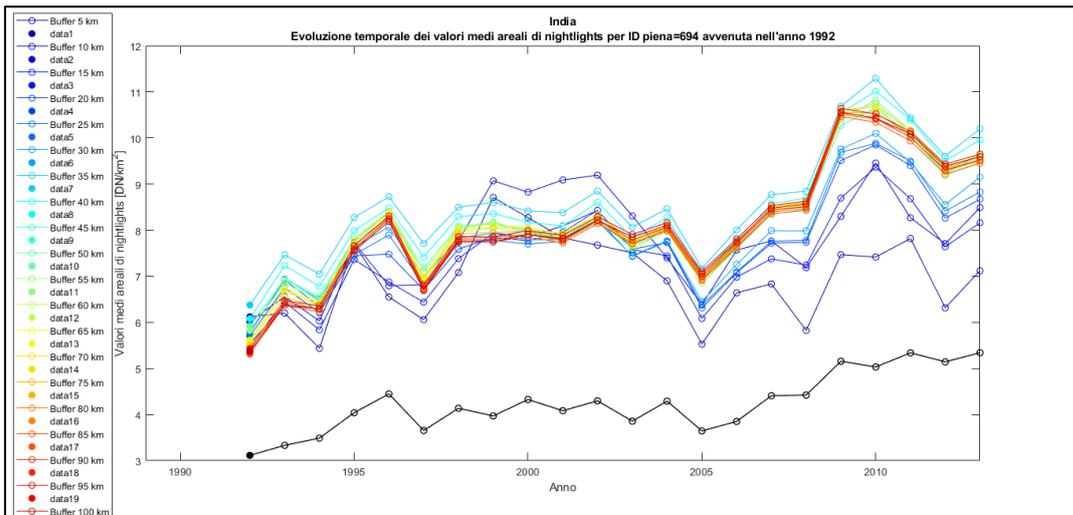


Figura 83. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 694 avvenuta nel 1992 nella regione di Tamil Nadu.

Per quanto riguarda l'evento alluvionale avvenuto nel 2012 (id:4001), la Figura 84 riporta l'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic solo per il primo anno successivo all'inondazione:

- Si osserva che i valori di tau-statistic risultano sempre positivi e che sono massimi a 5 km di distanza dal centroide (in cui si presenta un valore di tau-

statistic circa pari a 10,9). Dagli andamenti della densità totale in India si nota che nel 2013 essa è in aumento rispetto al 2012, quindi si può dedurre che per tutti i buffer si ha anche un aumento di densità di luminosità locale. Tuttavia, già a 10 km il valore di tau-statistic diminuisce in maniera netta (fino a 4,8), fenomeno che si conferma osservando che l'aumento di densità locale a 5 km dal centroide risulta molto più accentuato rispetto alle distanze di buffer successive (Figura 85).

- Dai 10 km in poi, la tau-statistic continua a diminuire gradualmente con l'aumentare della distanza di buffer.

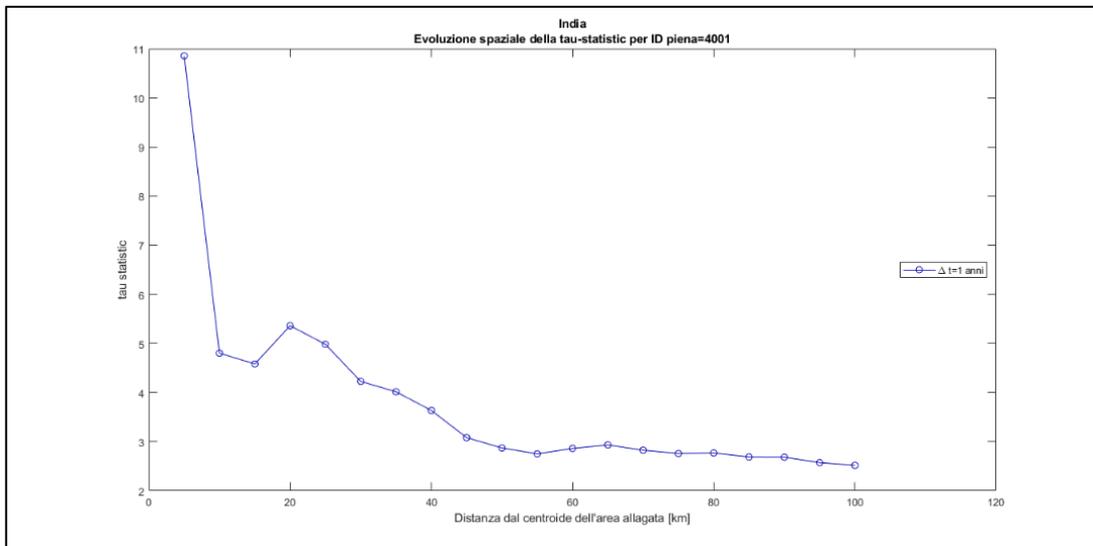


Figura 84. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 4001 avvenuto nel 2012 nella regione di Tamil Nadu.

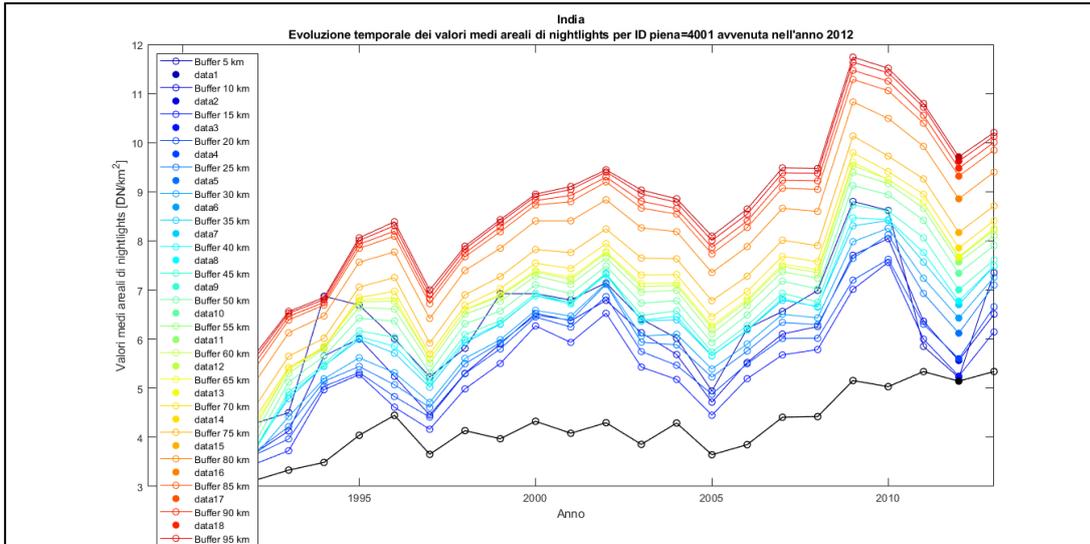


Figura 85. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 4001 avvenuto nel 2012 nella regione di Tamil Nadu.

Kerala

Il Kerala è una regione dell'India meridionale che occupa una stretta striscia di costa sud-occidentale (Figura 86).

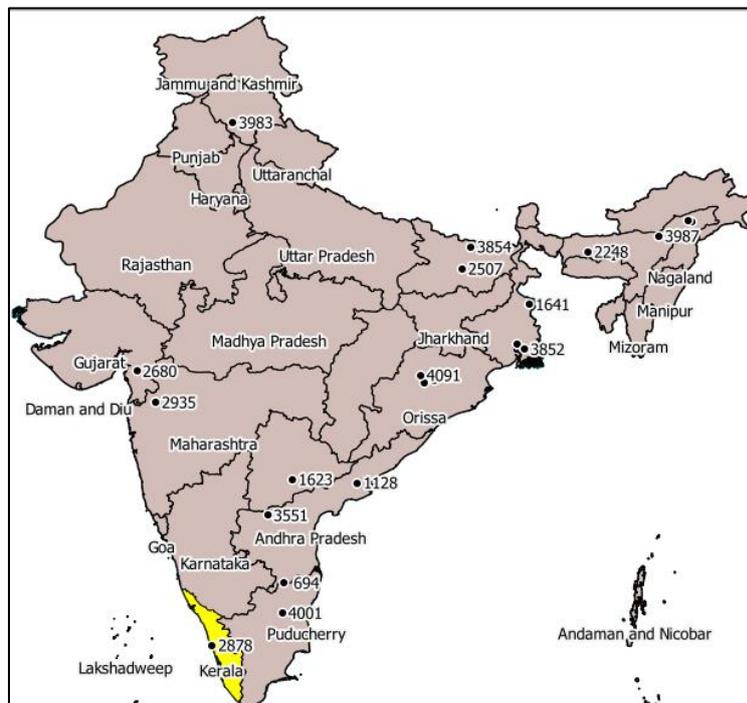


Figura 86. Localizzazione della regione di Kerala.

È formata da un tratto pianeggiante che percorre il territorio in lunghezza ed al suo interno si erge il Ghati occidentale con punte che superano i 2500 metri di quota. La sua piccola superficie ospita un grande numero di abitanti, tanto che la densità di popolazione è di circa 860 abitanti/km².

La zona è provvista di un vasto sistema di laghi e lagune salmastre nei pressi di Kochi: vi sono cinque grandi laghi collegati da canali naturali e artificiali ed alimentati da una quarantina di fiumi.

Nel 2006 in Kerala si verifica un evento di piena (id:2878) a causa di una pioggia monsonica, con centroide localizzato nei pressi del Chettuva Lake, a soli 3 km dalla costa (Figura 87).

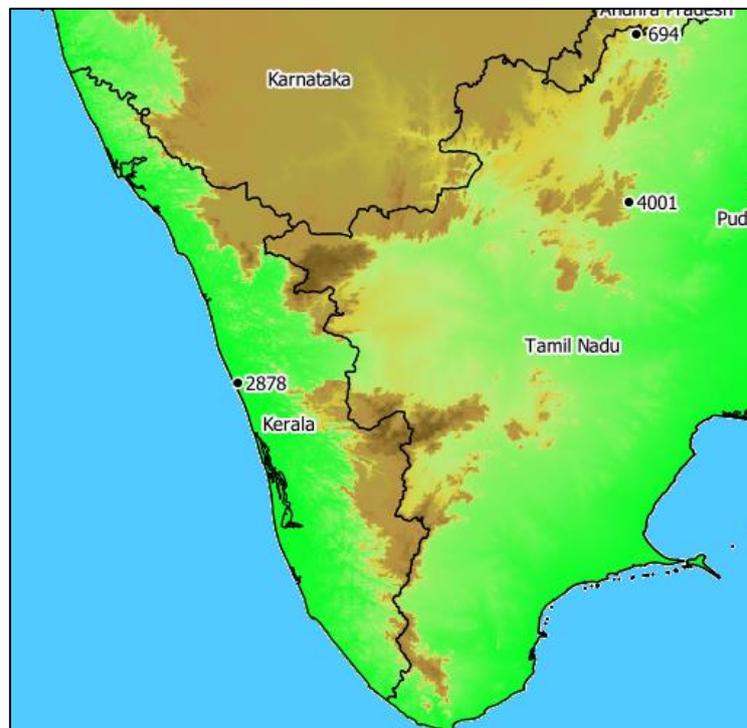


Figura 87. Localizzazione degli eventi alluvionali nella regione di Kerala.

L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 88):

- per i primi due anni dopo l'evento di piena si osservano valori di tau-statistic negativi nell'immediata vicinanza del centroide (5 km), perché i valori medi areali locali sono in diminuzione (Figura 89).
- Per gli anni seguenti la tau-statistic presenta valori positivi, massimi a 5 km di distanza di buffer, che tendono a diminuire all'aumentare della distanza ma sempre mantenendosi positivi. I picchi sono raggiunti nel 2009 e 2010 con valori di tau-statistic rispettivamente di 1,4 e 1,9 a 5 km dal centroide. Si nota anche che a 5 anni vi è una diminuzione (minimo relativo) forse dovuta ad un'inondazione che ha colpito la zona a circa 70 km da quella in esame, nel giugno 2011.
- Oltre i 20 km la tau-statistic assume valori stabili. Infatti, il picco di densità nei buffer è a tre/quattro anni, oltre continuo ad avere un ripopolamento (valori di tau positivi) anche se meno evidente di quello raggiunto nel 2009-2010

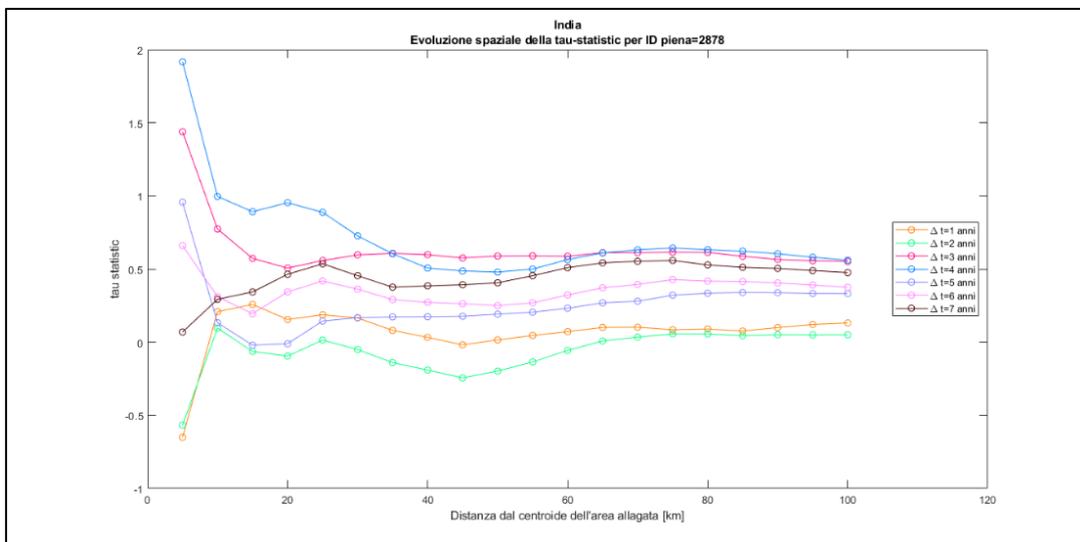


Figura 88. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2878 avvenuto nel 2006 nella regione di Kerala.

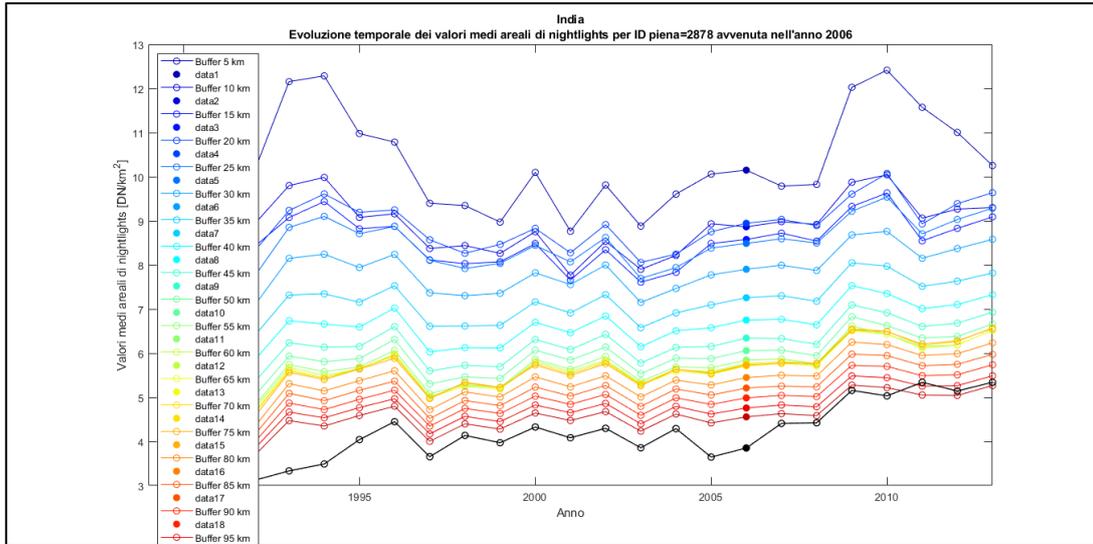


Figura 89. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2878 avvenuto nel 2006 nella regione di Kerala.

4.2 Regno Unito

Il secondo paese analizzato nel presente elaborato di tesi è il Regno Unito. Il clima in questa nazione è caratterizzato dall'influenza dei venti oceanici che, in aggiunta alla presenza di rilievi vicini alle coste occidentali, segnano una disparità climatica tra il versante Ovest, che è molto umido, e quello Est, più asciutto.

La stagione caratterizzata da maggiori precipitazioni è generalmente l'autunno: in tale periodo le precipitazioni sono abbondanti soprattutto al Nord e sui versanti occidentali, dove si raggiungono più di duecento giorni di pioggia all'anno. Inoltre, il livello del mare della costa britannica aumenta di circa 3 mm ogni anno ed i modelli di precipitazione mostrano evidenti segni di cambiamento, fattori che contribuiscono ad aumentare la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi. Basti pensare che nel 2019 si sono verificate alluvioni che hanno paralizzato intere zone dell'Inghilterra del Nord, bloccando le vie di comunicazione sia stradali che ferroviarie. L'Agenzia per l'ambiente del Regno Unito ha emesso 99 avvisi di alluvione solo il primo giorno di allarme (7 novembre), seguiti da 117 allerte di livello inferiore. Il 15 novembre le aree in emergenza sono diventate 147 dopo che ulteriori piogge hanno innalzato il livello dei fiumi. Le stime al termine dell'emergenza contano circa 1800 proprietà allagate; tra le zone più colpite figurano gli stati di Yorkshire, Humber, Midlands e alcuni territori dell'Inghilterra sud-orientale (Kottasova, 2019).

Attualmente si stima che circa il 5% della popolazione inglese viva nei 2200 km² di terra maggiormente a rischio di allagamento da innalzamento del livello del mare, mentre un'area con estensione pari a 10000 km² è minacciata da allagamenti fluviali. Nel Regno Unito, gli eventi alluvionali hanno causato gravi problemi come la chiusura di servizi ed infrastrutture, in particolare gli impianti idrici per il trattamento delle acque, quasi sempre nei pressi dei corsi d'acqua e quelli elettrici o ferroviari. Attualmente la spesa inglese per fronteggiare le minacce alluvionali ammonta a circa 4.4 miliardi (Insurance Choice UK, 2019). Nonostante un numero limitato di vittime dovute ad eventi alluvionali, vi sono prove crescenti che tali eventi possano avere

effetti a lungo termine sulla salute psicologica dei soggetti coinvolti, causando sofferenze, traumi e malesseri (Environment Agency, 2014).

Nel *Dartmouth Flood Archive* figurano 18 piene nel Regno Unito, avvenute tra il 1992 ed il 2013 e con severità pari a 2. Tre di queste sono state rimosse (id: 749, 2085, 4106) poiché il centroide delle rispettive aree alluvionate è localizzato in Irlanda e non nel Regno Unito. La lista completa di eventi è la seguente (Tabella 10):

ID piena	Anno	Durata (gg)	Zona	Regione	Causa
677	1992	0,5	centro	Inghilterra	Precipitazione intensa
697	1992	5	centro	Inghilterra	Precipitazione intensa
1333	1998	3	sud	Inghilterra	Breve pioggia torrenziale
1498	1999	6	centro	Inghilterra	Precipitazione intensa
1657	2000	2	centro	Inghilterra	Precipitazione intensa
2074	2002	3	nord	Scozia	Precipitazione intensa
2549	2004	1	sud	Inghilterra	Precipitazione intensa
2609	2005	2	nord	Scozia	Precipitazione intensa
2673	2005	1	centro	Inghilterra	Breve pioggia torrenziale
2764	2005	0,5	sud	Galles	Precipitazione intensa
2983	2006	2	nord	Scozia	Precipitazione intensa
3259	2008	11	centro	Inghilterra	Precipitazione intensa
3361	2008	1	nord	Irlanda del nord	Pioggia torrenziale
3573	2009	17	centro	Inghilterra	Precipitazione intensa
1816	2001	2	sud	Inghilterra	Breve pioggia torrenziale

Tabella 10. Tabella degli eventi alluvionali in Regno Unito.

Si tratta di eventi alluvionali aventi di durate comprese tra mezza giornata e 17 giorni, quindi molto meno duraturi rispetto a quelli indiani, che hanno causato complessivamente circa 31 vittime e poco più di diecimila sfollati. Si tratta di numeri imparagonabili a quelli registrati per il primo caso di studio; tuttavia, secondo alcuni esperti il rischio di alluvione in Inghilterra e Galles è in procinto di aumentare di circa 20 volte entro il 2080. Questa impennata sembrerebbe attribuibile, oltre che all'aumento delle precipitazioni e al livello del mare, ad una vulnerabilità socioeconomica delle infrastrutture, in particolare a causa del crescente utilizzo della tecnologia. Queste falle del sistema, soprattutto nel corso di un evento alluvionale,

potrebbero generare degli effetti a catena, causando l'interruzione di allarmi, sistemi di evacuazione ed il fallimento di misure precauzionali.

Le zone che sembra saranno soggette a maggior rischio futuro sono: Londra e l'estuario del Tamigi (a causa della rapida urbanizzazione), la costa sud-orientale (per innalzamento del mare) e le aree urbane dell'Inghilterra settentrionale (per gli intensi aumenti delle piogge) (Hall, et al., 2008).

4.2.1 Inquadramento geografico e demografico

Il Regno Unito è uno stato insulare dell'Europa Occidentale, che comprende l'intera Gran Bretagna e un sesto dell'Irlanda. È diviso in quattro nazioni, conosciute in patria come *Home Nations*, ossia "nazioni interne". Il paese è bagnato sia a nord che a sud-ovest dall'Oceano Atlantico mentre ad est si affaccia sul Mare del Nord e a sud sul Canale della Manica. L'unica terra emersa con cui confina è la Repubblica d'Irlanda (Figura 90).

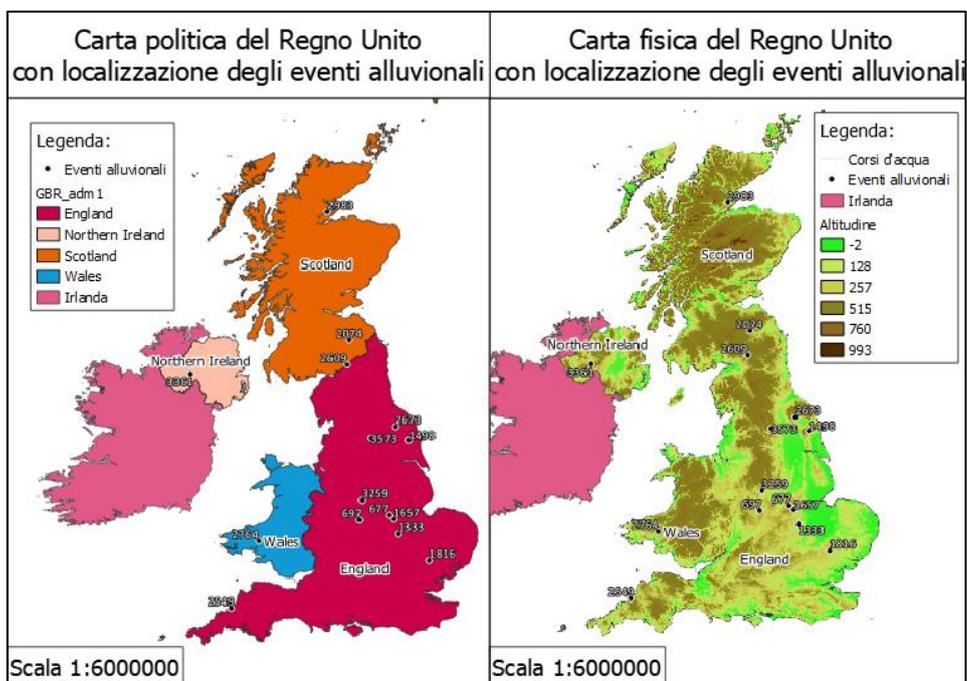


Figura 90. Regno Unito. Carta fisica e politica con localizzazione degli eventi alluvionali (le immagini sono state realizzate mediante QGIS).

La Gran Bretagna è costituita per la maggior parte da territorio inglese, ma include anche il Galles e la Scozia; ha una forma stretta e affusolata e presenta un paesaggio complesso da inquadrare a causa della sua variabilità. Fra le zone con maggior altitudine si annoverano gli altopiani della Scozia e del Galles, mentre le zone pianeggianti, perlopiù situate nelle zone dell'entroterra, sono limitate dai gruppi collinari e incise dai brevi fiumi del Sussex e del Kent.

I corsi d'acqua inglesi presentano un regime costante, dovuto alla regolare distribuzione delle piogge durante l'anno, infatti sono spesso navigabili. I canali più ripidi e non navigabili sono invece quelli scozzesi o del Galles, utilizzati in genere per la produzione idroelettrica. Dato che la zona occidentale è costituita da catene montuose adiacenti alle coste, i fiumi fluiscono principalmente sul versante orientale e i principali sono: lo Spey, il Dee, il Tay ed il Tweed, in Scozia; il Tyne, il Tees, l'Humber ed il Tamigi in Inghilterra. In compenso, nella direzione est-ovest si estende il fiume più lungo dell'isola, il Severn; nell'area meridionale, invece, si collocano solo corsi d'acqua brevi e di importanza secondaria. La Scozia è particolarmente ricca di laghi di montagna o glaciali (Loch Ness), si tratta di bacini lunghi, stretti e molto profondi che talvolta ritroviamo anche in Galles (Treccani, s.d.).

Il Regno Unito ospita 67545 milioni di abitanti, distribuiti su una superficie di 242521 km², dunque la densità di popolazione ammonta a 278,51 abitanti/km² poco più della metà di quella inglese, che è infatti la regione più popolata, oltre che più vasta del Regno Unito.

Anno	Popolazione	Variazione %
2013	64.105.654	+0,63
2014	64.596.752	+0,77
2015	65.110.034	+0,79
2016	65.648.054	+0,83
2017	66.040.229	+0,60

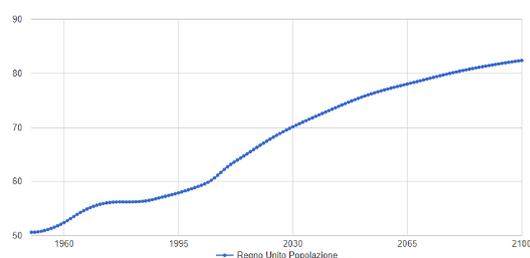


Tabella 11. Andamento popolazione nel Regno Unito dal 2011 al 2017 (Adminstat Regno Unito, 2017) e grafico per stime future (Nazioni Unite, Dipartimento per gli affari economici e sociali, 2015).

Osservando le statistiche effettuate sulla popolazione in Regno Unito negli ultimi anni, risulta evidente un continuo aumento di popolazione nel lungo periodo ed anche negli anni successivi al 2013 si ha un aumento medio di popolazione dello 0,73%. Tuttavia, considerando i dati estratti da QGIS che indicano i dati di luminosità nelle isole britanniche, ci si accorge che l'andamento è completamente sfasato rispetto a quello che dovremmo aspettarci. Nello specifico, si nota che tra il 1992 ed il 2011 si hanno dei valori altalenanti ma simili; negli ultimi tre anni di cui disponiamo dati invece, si assiste ad una netta diminuzione di densità di luminosità (Figura 91).

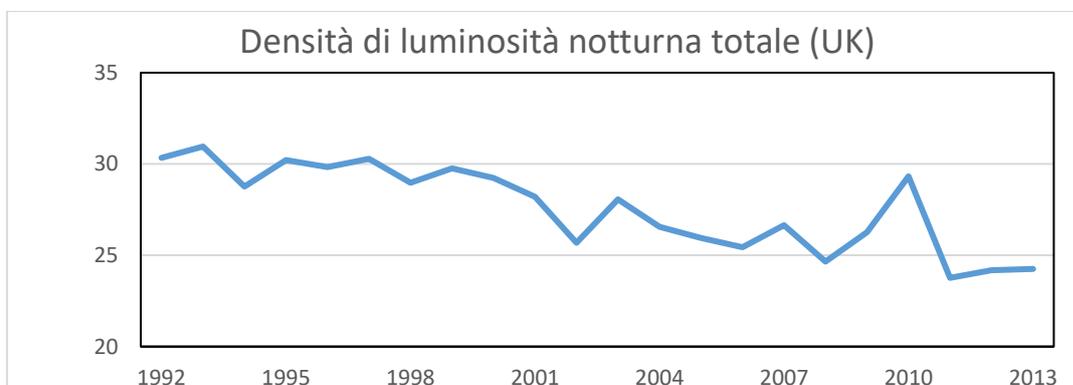


Figura 91. Andamento densità di luminosità notturna totale in Regno Unito dal 1992 al 2013.

Questo aspetto potrebbe giustificarsi col fatto che dal 2005 il governo inglese inizia a prendere piena coscienza di un problema da non sottovalutare: l'inquinamento luminoso. Già in quegli anni, infatti, viene promulgato il Clean Neighbourhoods and Environment Act, che rende questo tipo di disturbo soggetto alle stesse pene previste per atti connessi a odori e rumori stradali (Winterman, 2012). Successivamente, la Royal Commission on Environmental Pollution esamina, nell'ambito della relazione "Artificial Light in the Environment" (2009), la crescita esplosiva dell'illuminazione nel Regno Unito sviluppatasi dal secondo dopoguerra in poi. L'elaborato va a sottolineare quanto siano stati trasformati gli schemi luminosi tradizionali di luce/oscurità e quanto questo possa essere lesivo per gli organismi viventi. In altre parole, si evidenzia quanto spesso si sottovalutino gli effetti negativi della luce, che viene spesso percepita come fenomeno indistintamente naturale e benigno. Per ovviare

alle mancanze del passato, la Commissione richiede dunque un massimo impegno a preservare gli ecosistemi naturali, eliminando quando possibile lo sfruttamento della luce artificiale non necessaria, e a riesaminare la riduzione dei rischi garantita grazie ad alti livelli di luminosità notturna. Si richiede inoltre di valutare intensità e orientazione di tutte i nuovi impianti di luce da installare e che i dipartimenti governativi responsabili rinnovino la legislazione in materia di inquinamento luminoso (The Royal Commission on Environmental Pollution, 2009). Perciò, la popolazione inglese nel corso degli anni è stata soggetta a una sensibilizzazione sempre maggiore nei confronti di queste tematiche, tanto che sono state portate avanti varie politiche di riduzione di luci notturne, alcune ancora in vigore. Alcuni esempi sono forniti dalla CPRE (*Campaign to protect rural England*): nel 2015 in Northumberland è iniziato un programma di modernizzazione e sostituzione delle luci stradali che prevedono nuove tecnologie led poco invasive; lo stesso è avvenuto nell'isola di Wight. I miglioramenti raggiunti sono visibili mediante confronto di immagini satellitari di luminosità artificiale notturna, sempre tenendo conto della possibile influenza della variabilità delle condizioni climatiche (Earth Observation Group; NOAA, 2016).

4.2.2 Applicazione della metodologia tau-statistic per eventi alluvionali registrati in Regno Unito: analisi dei risultati

Gli eventi alluvionali considerati sono stati divisi, anche nel caso del Regno Unito, in base alle zone in cui si sono verificati: i risultati finali saranno presentati seguendo nuovamente una suddivisione regionale.

Le informazioni riguardanti le regioni del Regno Unito, l'idrografia e la localizzazione delle zone inondate, sono state reperite da siti web di informazione (Wikipedia, il Reporter) e tramite Google Earth, in cui si è caricato il file *kml* che contiene le coordinate dei centroidi delle aree alluvionali.

Le *home regions* interessate da inondazioni partendo dall'estremo settentrionale sono le seguenti:

- Scozia
- Irlanda del Nord
- Inghilterra
- Galles



Figura 92. Regno Unito. Immagine satellitare con localizzazione dei centroidi delle aree allagate.

La regione in cui si è manifestato un maggior numero di eventi alluvionali è l’Inghilterra, in particolare la zona dello Yorkshire e delle Midlands orientali (nei pressi di Hampton, Leicester e Derby).

Scozia

La Scozia (Figura 93) è una delle nazioni costitutive del Regno Unito ed è localizzata all’estremo settentrionale della Gran Bretagna, di cui occupa un terzo della superficie.

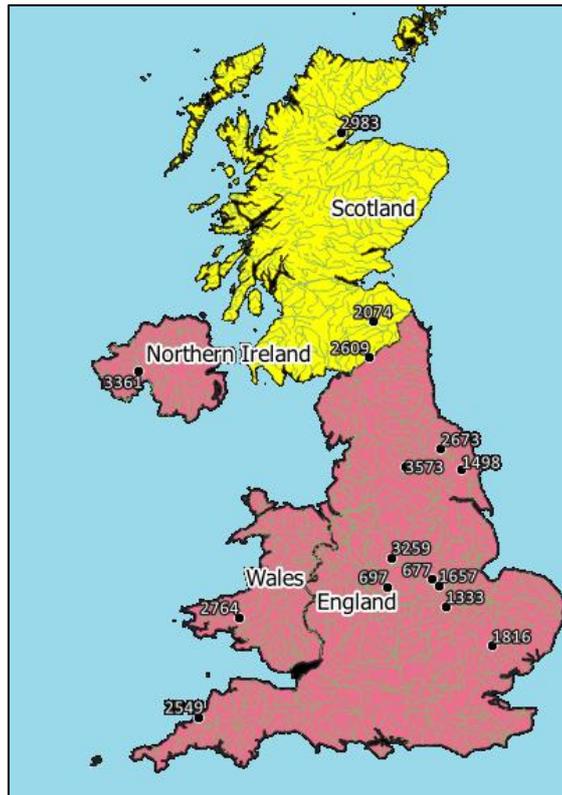


Figura 93. Localizzazione del Paese Scozia.

In base alla geografia fisica si riconoscono 3 aree principali:

- Highlands, la zona montuosa delle brughiere e dei fiordi sulla costa, separate dalle Lowlands dalla regione dei grandi laghi;
- Lowlands, regione centrale e formata dalle valli dei fiumi, dove vivono la maggior parte degli Scozzesi e in cui si collocano le maggiori industrie;
- Uplands, regione montuosa ma con vette meno elevate rispetto a quelle delle Highlands.

I fiumi principali sfociano tutti nel Mare del Nord, ad eccezione del Clyde, il corso d'acqua che attraversa Glasgow, che poi si riversa lungo la costa orientale dell'isola.

Gli eventi alluvionali registrati in Scozia sono id:2074 del 2002, id:2609 del 2005 e id:2983 del 2006 (Figura 94).

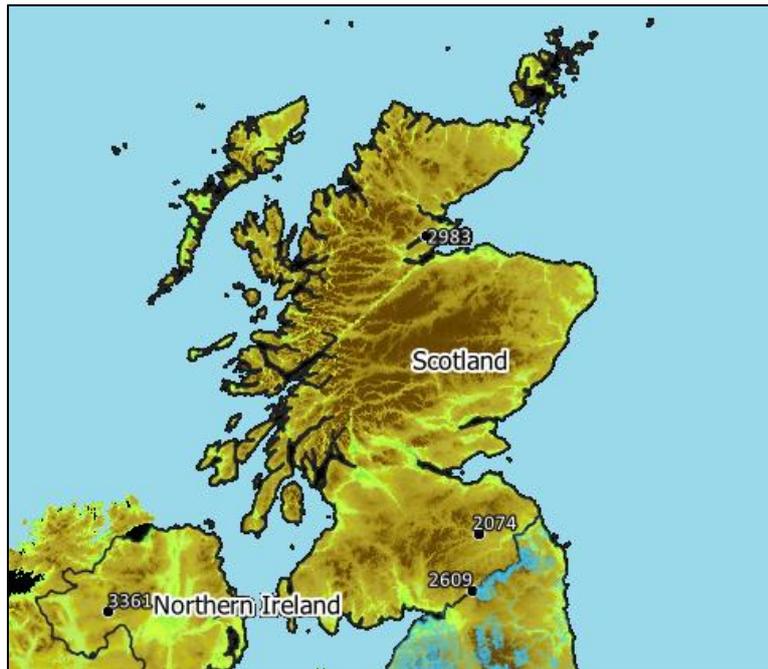


Figura 94. Localizzazione degli eventi alluvionali in Scozia.

L'evento alluvionale avvenuto nel 2002 (id: 2074) si è registrato nella zona di Tweedbank, in seguito ad un'esondazione del fiume Tweed, uno dei principali corsi d'acqua scozzesi. L'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 95):

- Per i primi due anni successivi all'evento di piena non si notano andamenti particolarmente rilevanti, se non un lieve aumento di tau-statistic entro i 10 km; a 15 km si ha una diminuzione. A distanze maggiori, sia per il 2003 che per il 2004 la tau-statistic tende a discendere e a stabilizzarsi. Il terzo anno dopo l'alluvione si registra allo stesso modo un lieve aumento entro i 15 km di distanza di buffer, ma da qui in poi la tau-statistic risulta negativa per tutte le distanze indagate. Questo dipende dal fatto che la densità di luminosità totale in Regno Unito è parecchio altalenante, facendo sì che il denominatore della tau assuma spesso valori negativi.
- Gli andamenti più rilevanti si notano dopo quattro e sette anni dall'inondazione: nel 2006 si osservano picchi massimi di tau-statistic a 10 km,

45 km, 80 km e 100 km dal centroide; nel 2009 invece picchi minimi circa alle medesime distanze. Osservando il grafico in figura 96 ci si accorge del fatto che quei massimi o minimi relativi, in realtà evidenziano una dislocazione della popolazione, poiché la densità di luminosità artificiale in quegli anni, calcolata alle distanze di buffer citate, è sempre minore rispetto a quelle registrate nell'anno di avvento della piena.

- Per gli altri anni e a distanze di buffer maggiori, si ha una stabilizzazione dei valori di tau-statistic intorno allo zero.

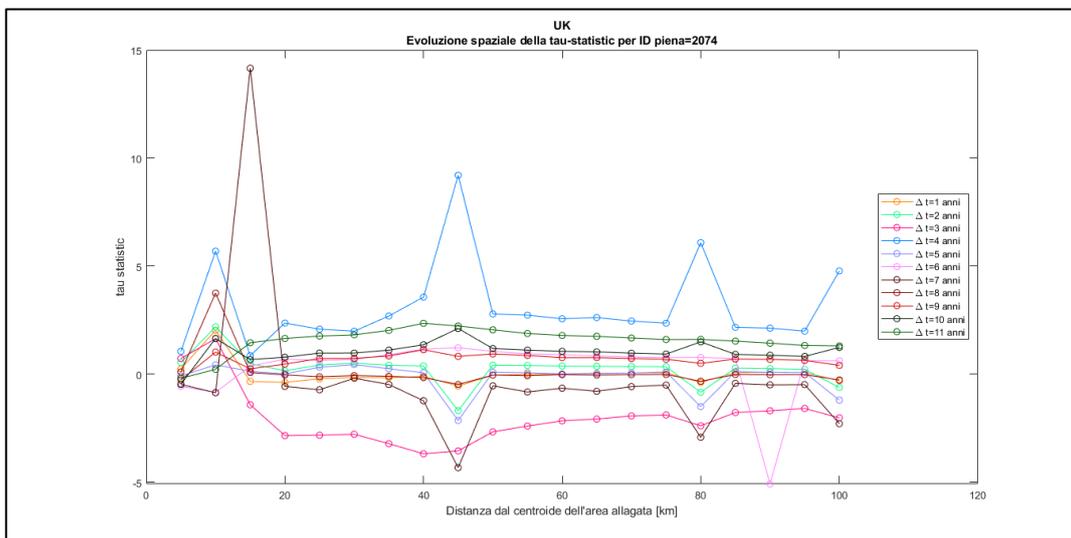


Figura 95. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2074 avvenuto nel 2002 in Scozia.

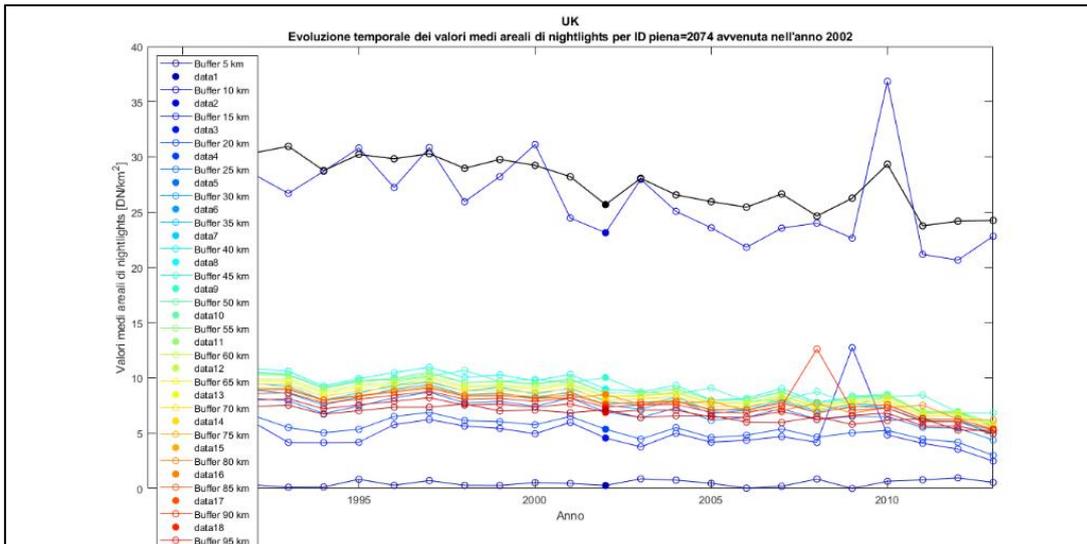


Figura 96. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2074 avvenuto nel 2002 in Scozia.

Un altro evento alluvionale risale al 2005 (id: 2609), poco più a sud della precedente, a ridosso del confine con l'Inghilterra e ad una decina di chilometri dal Lago di Kielder: il più grande lago artificiale di Europa, nella contea di Northumberland.

Dall'osservazione della figura 97, che mostra l'evoluzione spazio-temporale delle tau-statistic per l'evento di piena in questione, si deduce che:

- Non ci sono andamenti particolari subito dopo l'evento alluvionale e a brevi distanze dal centroide.
- Tuttavia, si osserva che per il terzo anno successivo all'evento alluvionale (2008) si ha un picco massimo di tau-statistic ad 85 km di distanza di buffer. Dalla figura 99 si nota che questo massimo in realtà coincide con una dislocazione della popolazione, in quanto sia il numeratore che il denominatore della tau-statistic assumono valori negativi (la tau-statistic sarà perciò positiva). Inoltre, si registra un andamento piuttosto variabile per l'anno 2009 (quarto anno successivo all'evento): si registrano dei minimi di tau-statistic per i buffer di 5km, 15 km, 45 km, 80 km e 100 km. Osservando gli andamenti dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale (Figura 99), si può notare che per le distanze di buffer citate si ha un evidente

riduzione della densità locale di popolazione, mentre quella totale è in aumento rispetto al 2005.

- Ad eccezione dell'anno appena descritto, si riscontra una sostanziale stabilità anche a grandi distanze dal centroide.

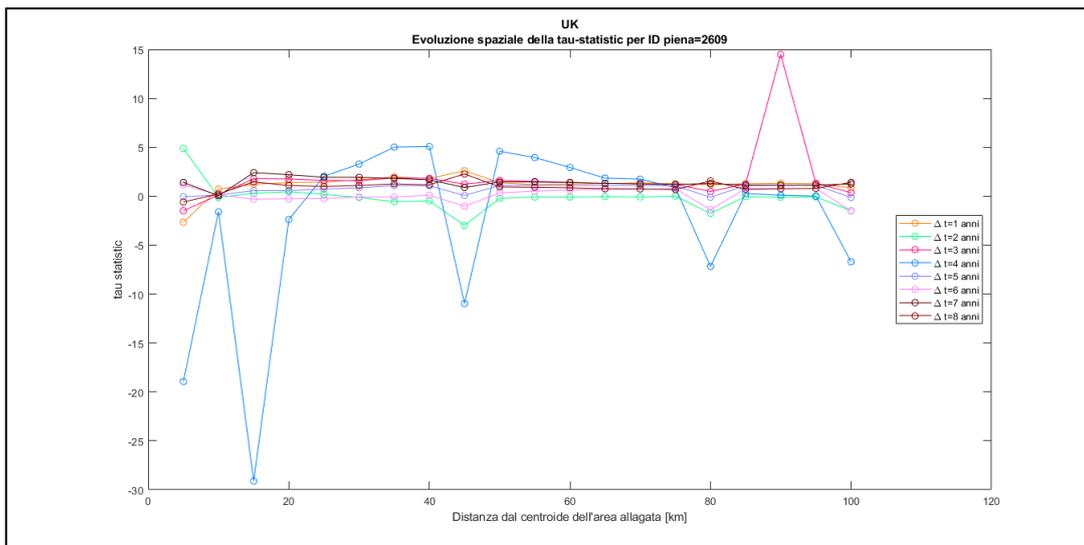


Figura 97. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2609 avvenuto nel 2005 in Scozia.

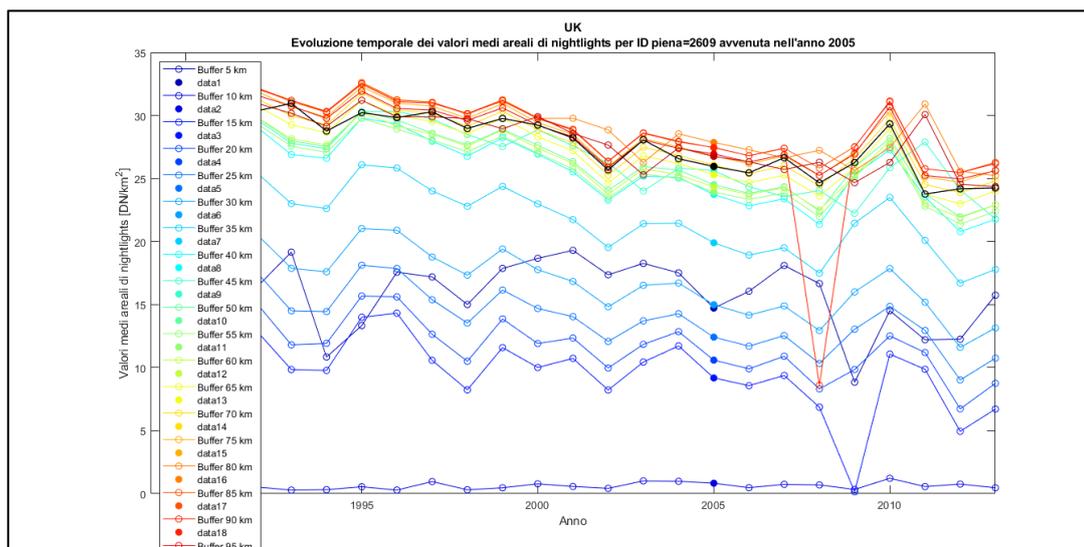


Figura 98. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiali per l'evento alluvionale id: 2609 avvenuto nel 2005 in Scozia.

L'evento alluvionale osservato nel 2006 (id:2983) vede il centroide dell'area allagata posizionato a ridosso del delta del fiume Conon e cioè lungo la costa, nella zona dei fiordi delle Highlands. Il fiume Conon è un corso d'acqua rilevante poiché è parte integrante del sistema idroelettrico di Conon, che comprende anche le dighe di Loch Luichart, Loch Meig e Loch Achonachie.

Dall'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic risulta che (Figura 99) non vi siano variazioni interessanti di tau-statistic, ad eccezione di due minimi rispettivamente a 2 e 3 anni dell'evento di piena: l'uno a 90 km e l'altro a 15 km dal centroide dell'area allagata. Dalla figura 100 si evince che entrambi derivino da una dislocazione di popolazione in quelle zone, poiché si evidenzia un minimo di densità di luminosità locale in entrambi i casi.

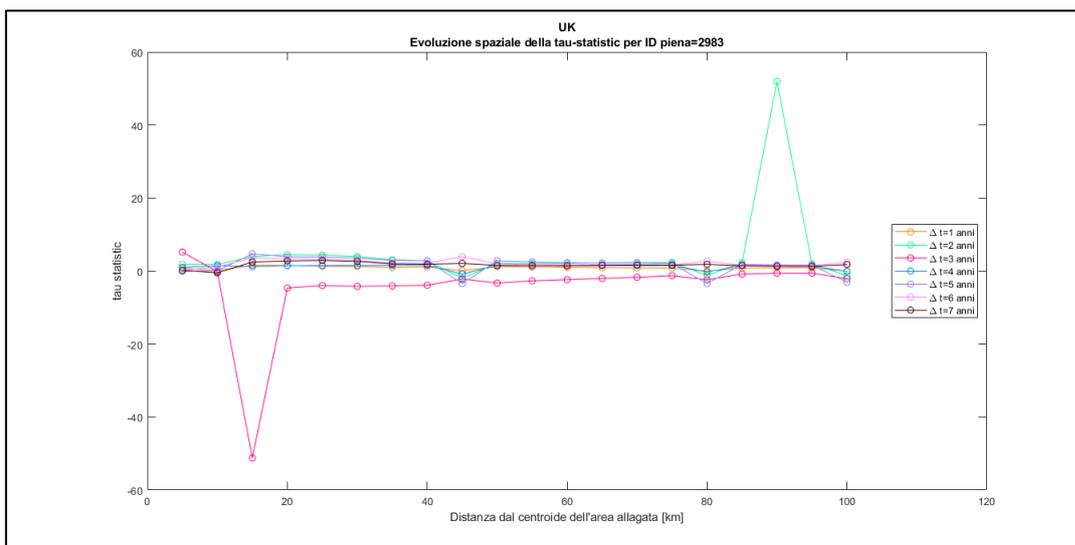


Figura 99. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2983 avvenuto nel 2006 in Scozia.

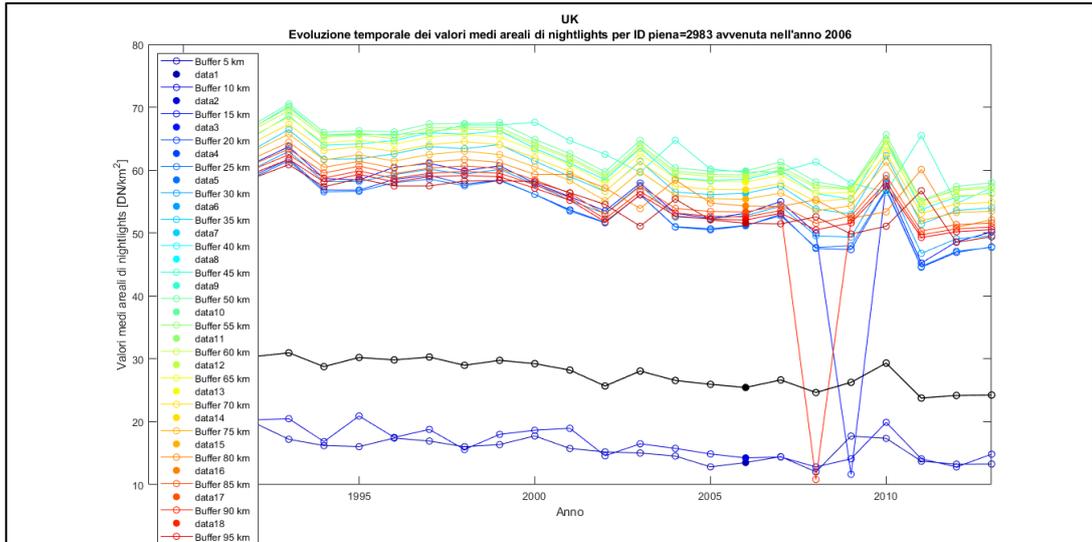


Figura 100. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2983 avvenuto nel 2006 in Scozia.

Irlanda del Nord

L'Irlanda del Nord è costituita da una linea costiera molto irregolare che si affaccia sull'Oceano Atlantico a Nord, sul Canale del Nord a est e sul Mar d'Irlanda a sud-est (Figura 101).

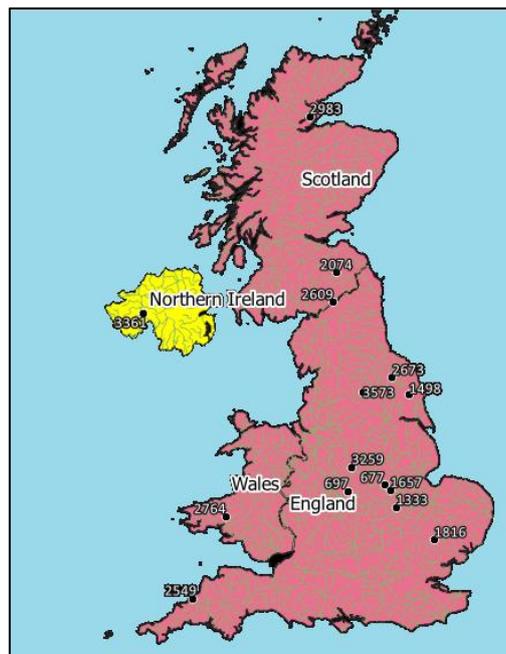


Figura 101. Localizzazione del Paese Irlanda del Nord.

L'interno della regione è costituito da una pianura ricca di pascoli e prati, con al centro il Lago Neagh, il più grande tra quelli irlandesi e britannici. I fiumi principali sono il Lagan, la cui valle è dominata da Belfast, il Foyle ed il Bann.

In questa regione si registra un solo evento di piena (id: 3361) avvenuto nel 2008 nei pressi del Mourne, un corso d'acqua tributario del Foyle (Figura 102).

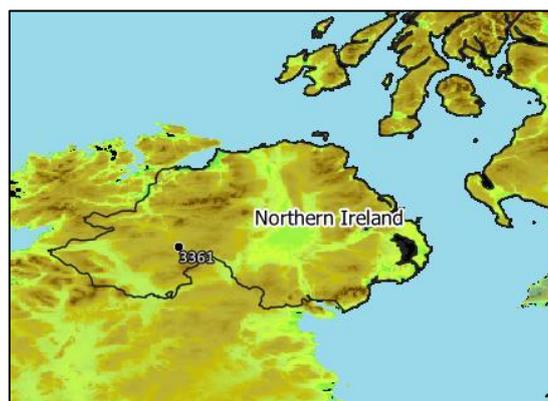


Figura 102. Localizzazione degli eventi alluvionali in Irlanda del Nord.

Questa alluvione si inserisce nelle “2008 Irish Flash Floods”, una serie di inondazioni verificatesi in Irlanda nel mese di agosto, interessando moltissime contee tra cui Limerick, Cork, Kilkenny, inondando anche centri urbani come Dublino o Belfast.

Dall'evoluzione spazio-temporale di tau-statistic si osservano i seguenti andamenti (Figura 103):

- Il primo anno dopo l'evento di piena si ha un lieve aumento di tau-statistic a 5 km di buffer (3,9), che poi decresce raggiungendo il minimo a una distanza di 15 km (-8,7). A 20 km di distanza dal centroide i valori di tau-statistic si stabiliscono attorno allo zero. Nel 2010 (due anni dopo l'evento di piena) non vi sono variazioni rilevanti di tau-statistic che si attesta sempre su valori variabili tra -0,3 e 0,1.

- Negli anni successivi si hanno degli andamenti particolarmente accentuati a tre, quattro e cinque anni dall'evento di piena. In particolare, per gli anni 2011 e 2012 si ha un aumento di tau-statistic nella vicinanza del centroide, che potrebbe far presumere che si sia persa memoria dell'evento alluvionale. In realtà, dalla figura 104 si osserva che la densità totale in quegli anni, è in diminuzione rispetto al 2008; perciò gli aumenti di tau-statistic corrispondono a dislocazioni della popolazione dal luogo in questione e diminuzioni di tau-statistic corrispondono a ripopolamento. Minimi si avvertono nel 2011 a 45 km, 80 km e 100 km dall'evento alluvionale, tuttavia, essi assumono valori massimi negli anni seguenti. Dunque, potremmo dire che generalmente la popolazione si stia spostando da queste zone ma indipendentemente dall'evento estremo avvenuto, dato che le dislocazioni più rilevanti avvengono dopo quattro o cinque anni dalla piena.

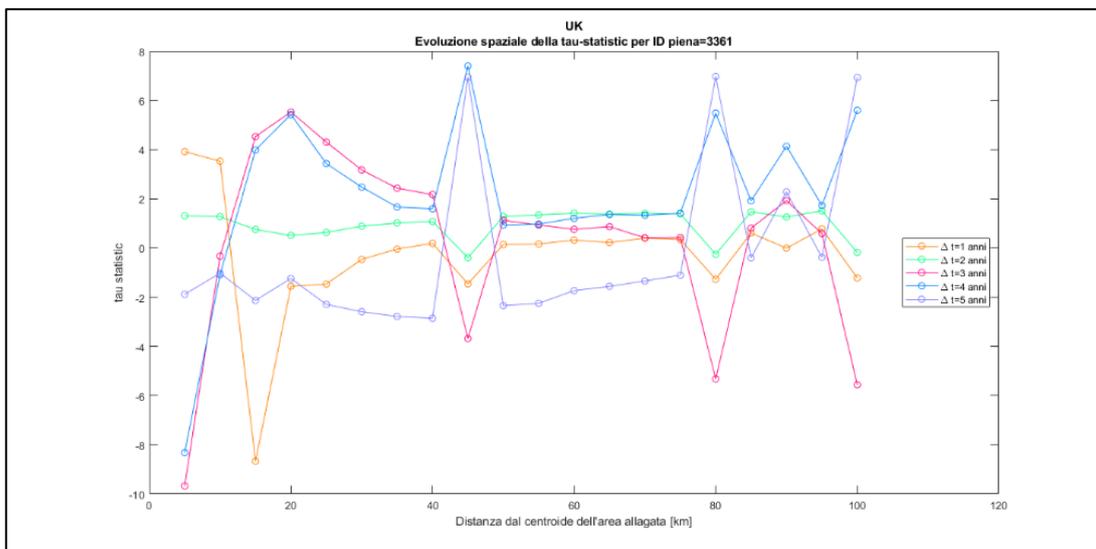


Figura 103. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3361 avvenuto nel 2008 in Irlanda del Nord.

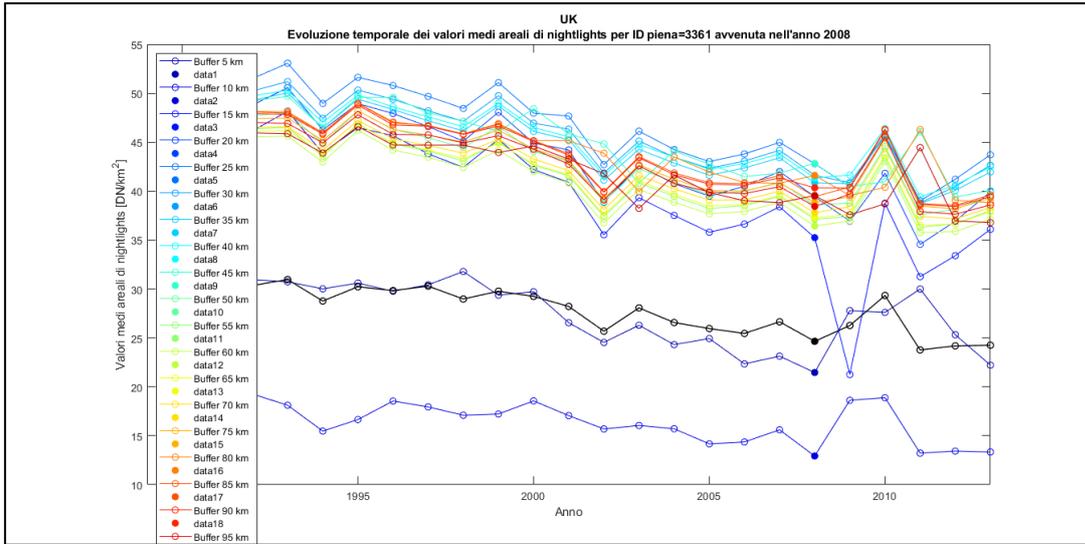


Figura 104. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3361 avvenuto nel 2008 in Irlanda del Nord.

Inghilterra

L'Inghilterra condivide le frontiere con la Scozia a Nord e col Galles ad Ovest e include quasi tutta l'area centro-meridionale della Gran Bretagna (Figura 105).

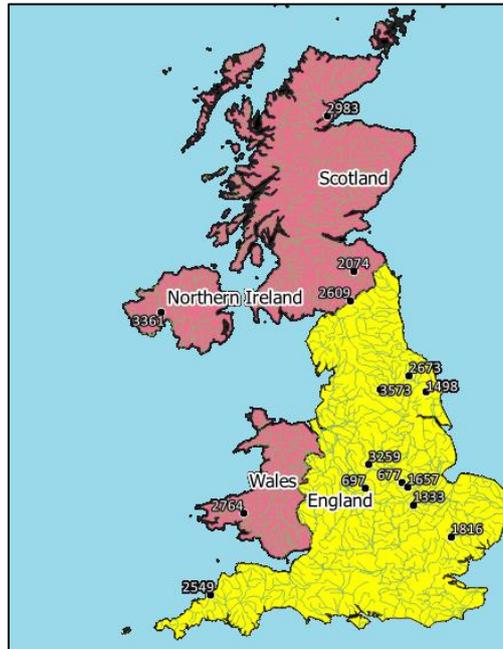


Figura 105. Localizzazione del Paese Inghilterra.

Il territorio è per lo più collinare, ma comprende anche delle zone montuose settentrionali, divise dalle colline dalla Tees-Exe line. Nella zona orientale del paese si trovano le pianure, con paludi bonificate per consentirne la coltivazione.

Il fiume principale è il Tamigi (323 km), che è il secondo per lunghezza dopo il Severn (354 km); altri fiumi importanti sono il Trent, l' Humber, il Tyne, il Dee e l'Avon.

In questa zona del Regno Unito, tra il 1992 ed il 2013, avvengono ben nove eventi alluvionali con grado di severità 2 (Figura 106), che potremmo suddividere in tre sottogruppi:

- Contea dello Yorkshire (id: 1498, 2673, 3573).
- Midlands (id: 677, 697, 1333, 1657, 3259)
- Altre regioni (id: 1816, Essex; 2549, Cornovaglia)

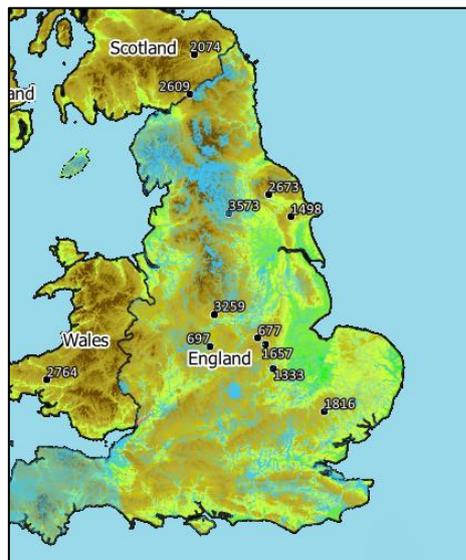


Figura 106. Localizzazione degli eventi alluvionali in Inghilterra.

A causa di intensi temporali avvenuti nel mese di giugno del 2005, si svilupparono eventi estremi di piena nella zona settentrionale dello Yorkshire. I residenti furono costretti a fare a meno della corrente elettrica per più di ventiquattro ore e le sponde del fiume Rye furono distrutte dalla forza impetuosa della corrente e dal livello dell'acqua che giunse fino alla cima del ponte (BBC, 2005).

La regione dello Yorkshire è stato teatro di un'inondazione (id: 1498) nel 1999; il centroide di questa piena ricade nelle vicinanze del Gypsey Race, un ruscello che scorre all'interno di falde acquifere di gesso in sotterraneo, per poi riemergere e sfociare nel mare del Nord, al porto di Bridlington. L'alluvione si è ripetuta anche nel 2012, quando fu allagato il villaggio di Burton; in alcuni punti l'acqua raggiunse profondità di 0,61 m (Gypsey Race, s.d.).

Dall'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic si osservano i seguenti andamenti (Figura 107):

- Il primo anno dopo l'evento alluvionale (2000) si manifesta con dei valori di tau-statistic che si discostano parecchio dagli altri: a 5 km di distanza di buffer essa assume un valore pari a -2,3, che tende a crescere fino a 2,7 a 10 km, per poi rimanere all'incirca stabile fino a distanze di buffer di 45 km. Dal 2001 in poi, i valori di tau-statistic tendono a stabilizzarsi su piccoli valori positivi perché diminuiscono sia le densità di luminosità locali che quelle totali. Infatti, osservando gli andamenti dei valori medi areali in figura 108, si può affermare che per i primi tre anni successivi all'alluvione, si assiste ad una diminuzione di luminosità notturna locale all'interno di tutti i buffer.
- In seguito, i valori tendono a stabilizzarsi ad esclusione dei dati relativi al 2010 (cioè a 11 anni dall'evento alluvionale): qui si hanno valori di tau sempre positivi, dunque la popolazione è sempre in diminuzione rispetto all'anno della piena. Inoltre, si manifestano dei picchi massimi, e cioè delle spiccate dislocazioni di popolazione, a 35 km di buffer (9,1) ed a 80 km di buffer (8,2).

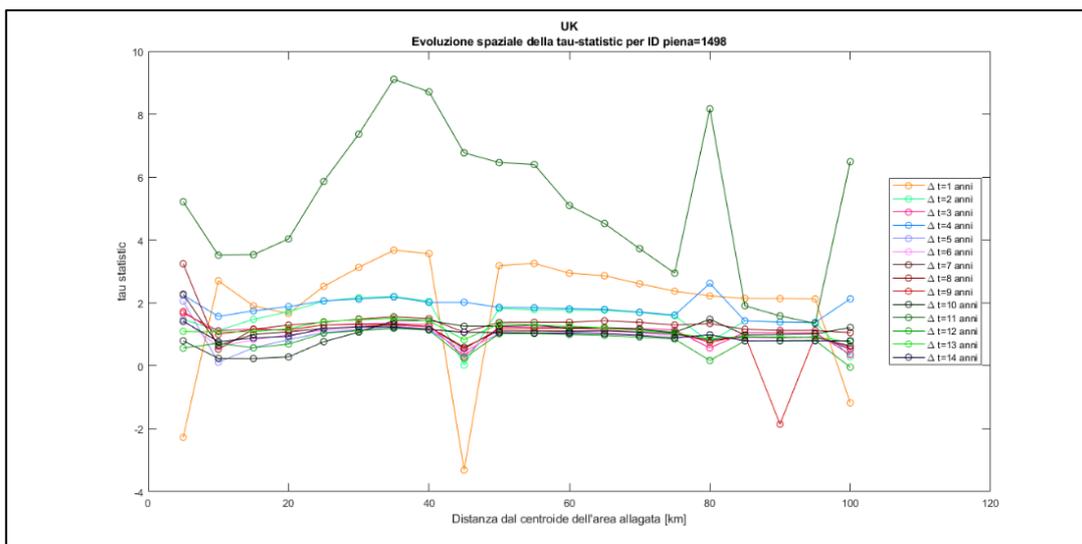


Figura 107. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1498 avvenuto nel 1999 nella regione di Yorkshire.

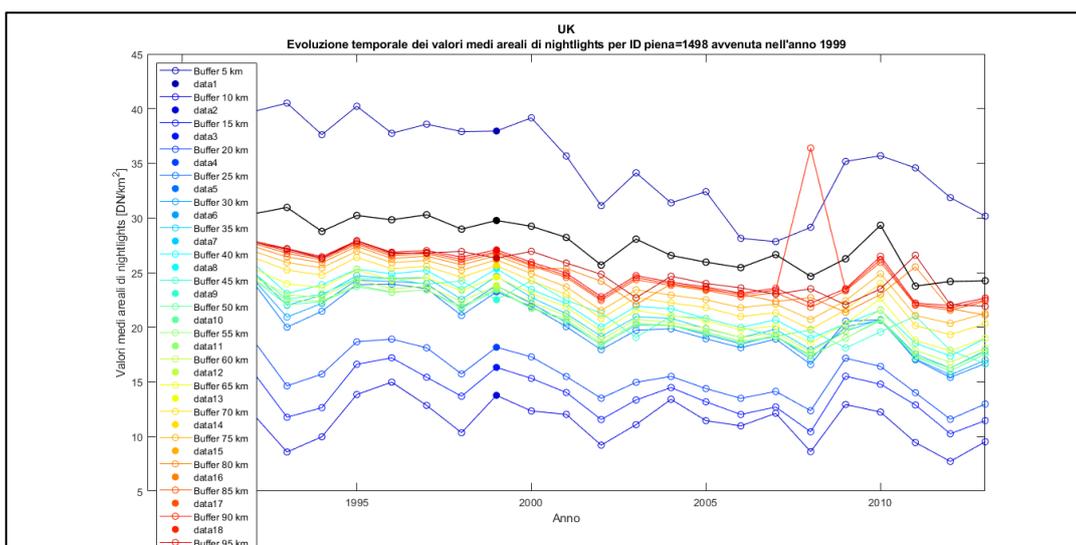


Figura 108. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1498 avvenuto nel 1999 nella regione di Yorkshire.

L'inondazione con codice identificativo 2673 si riferisce ad un episodio avvenuto il 19 giugno 2005, nei pressi del fiume Riccal, un corso d'acqua che scorre all'interno del North Yorks Moors National Park ed affluente del Rye.

Osservando l'andamento spazio-temporale della tau-statistic, emergono le seguenti caratteristiche (Figura 109):

- Per il primo anno dopo la piena non si hanno scostamenti rilevanti: la tau-statistic assume valori intorno allo zero per quasi tutti i buffer; il secondo anno si ha un lieve innalzamento positivo della tau-statistic, dovuto ad aumenti di densità locale e totale (Figura 110).
- Negli anni seguenti si osserva il minimo assoluto nel 2009 per distanze di buffer di 5 km (-20,12). Questo aspetto può essere legato al fatto che in quell'anno avvengono, nelle medesime zone, delle flash floods di una certa entità. Oltre i 20 km anche la tau-statistic del 2009 tende a stabilizzarsi (a circa -2) ma mantenendo valori negativi per tutte le distanze di buffer.

Si può rintracciare una diminuzione di popolazione di entità minore anche tre anni dopo la piena, ma per distanze molto più ampie, a circa 90 km dal centroide: qui la tau-statistic presenta un massimo, ma in realtà vi è una dislocazione di popolazione localmente, oltre che una diminuzione di luminosità totale in Regno Unito.

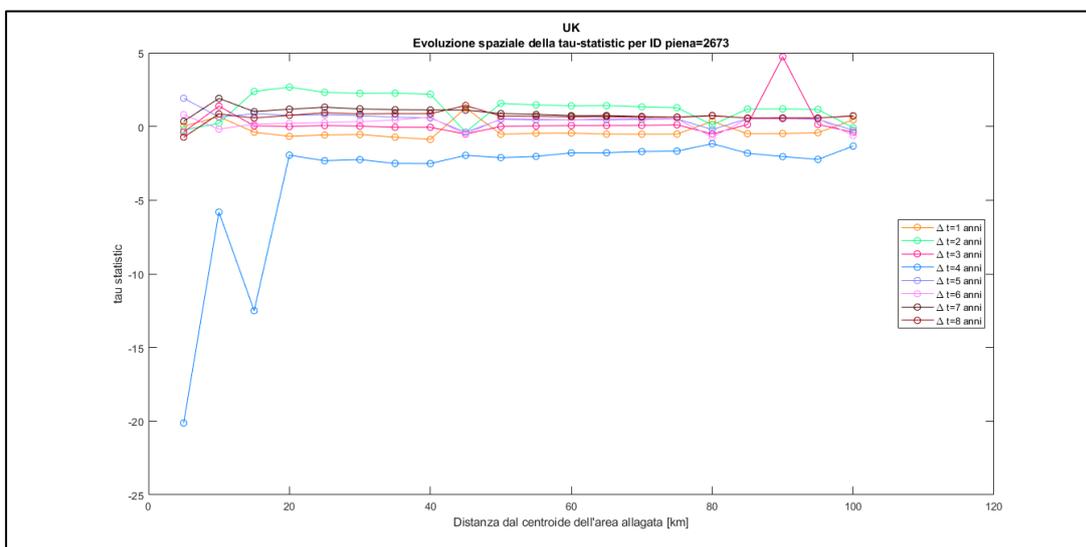


Figura 109. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2673 avvenuto nel 2005 nella regione di Yorkshire.

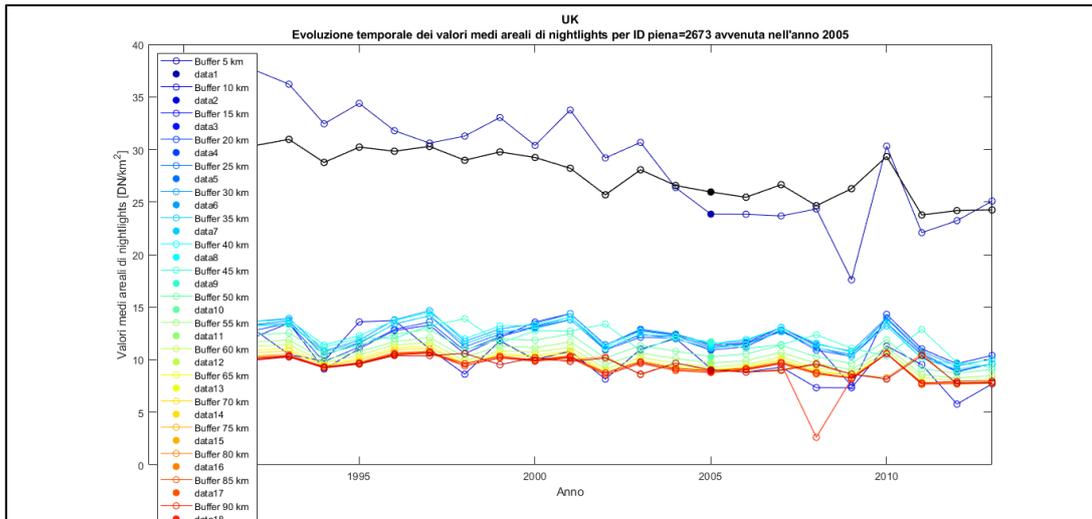


Figura 110. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2673 avvenuto nel 2005 nella regione di Yorkshire.

Un altro evento estremo è quello che si verifica nei pressi del Fewston Reservoir, sempre nella contea dello Yorkshire (id: 3573, evento del 2009). Osservando la figura 111 si notano le evoluzioni spazio-temporali di tau statistic:

- Si evidenzia una diminuzione di tau per il primo anno dopo la piena, nell'intorno dei 15 km, ed un aumento di essa per il secondo anno successivo all'evento alluvionale, sempre alla stessa distanza. Si notano andamenti particolari anche per buffer di 45 km, 80 km e 100 km di distanza dal centroide dell'area allagata, che coincidono con minimi per tutti gli anni ad eccezione del primo e massimi per quest'ultimo. Osservando la figura 112, si comprende che la densità di luminosità totale è massima nel 2010, e seconda soltanto al 2009 (anno di avvento della piena), perciò il primo anno dopo la piena mostrerà andamenti opposti della tau-statistic. In altre parole, l'alternarsi di massimi e minimi è sempre responsabilità dell'andamento irregolare della densità di luminosità totale del paese. Oltre a questo, si può osservare che la densità di luminosità locale ai 5 km è molto più elevata rispetto sia alla media nazionale, che a tutte le altre distanze di buffer. Questo potrebbe dipendere dal fatto che il centroide della piena si trova a qualche decina di chilometri da

aree montuose e poco popolate, che fanno sì che la densità di luminosità locale diminuisca per distanze maggiori di 10 km di buffer.

- Il terzo e quarto anno dopo l'evento alluvionale, mostra gli stessi andamenti del secondo, seppur meno accentuati. Dunque, si avrà: un massimo a 15 km, che coincide con una dislocazione di popolazione, e poi dei minimi (che, se negativi, si traducono con aumento di popolazione) a 45 km, 80 km e 100 km.
- Ad esclusione delle distanze di buffer già specificate, non si notano scostamenti interessanti: il primo anno si mantiene su valori di tau-statistic leggermente negativi, mentre gli altri su quantità di poco positive. Come già detto, questa differenza dipende solo dal denominatore della tau-statistic e in tutti i casi indica una diminuzione generale di densità di luminosità sul territorio.

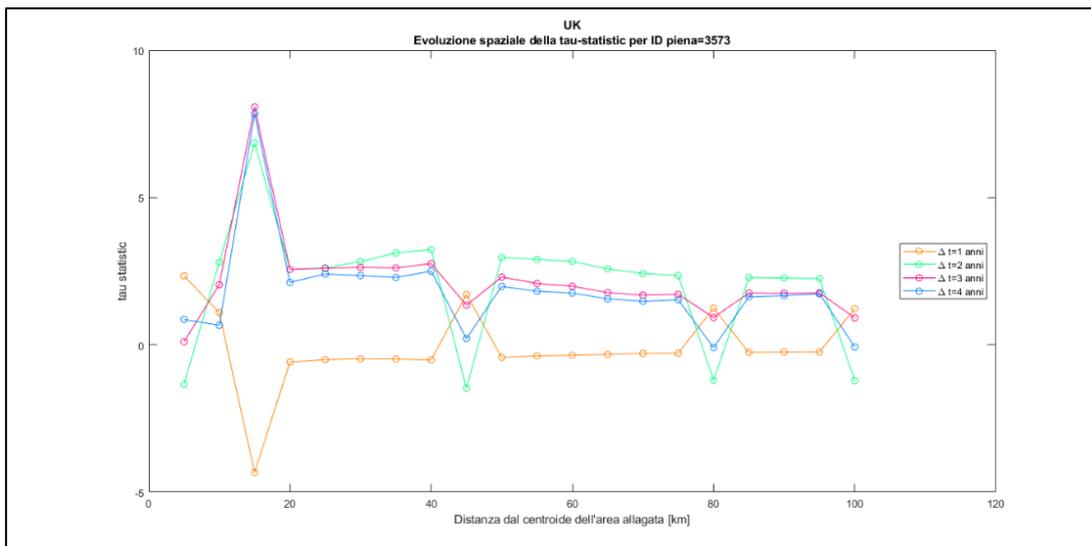


Figura 111. Evoluzione spatio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 3573 avvenuto nel 2009 nella regione di Yorkshire.

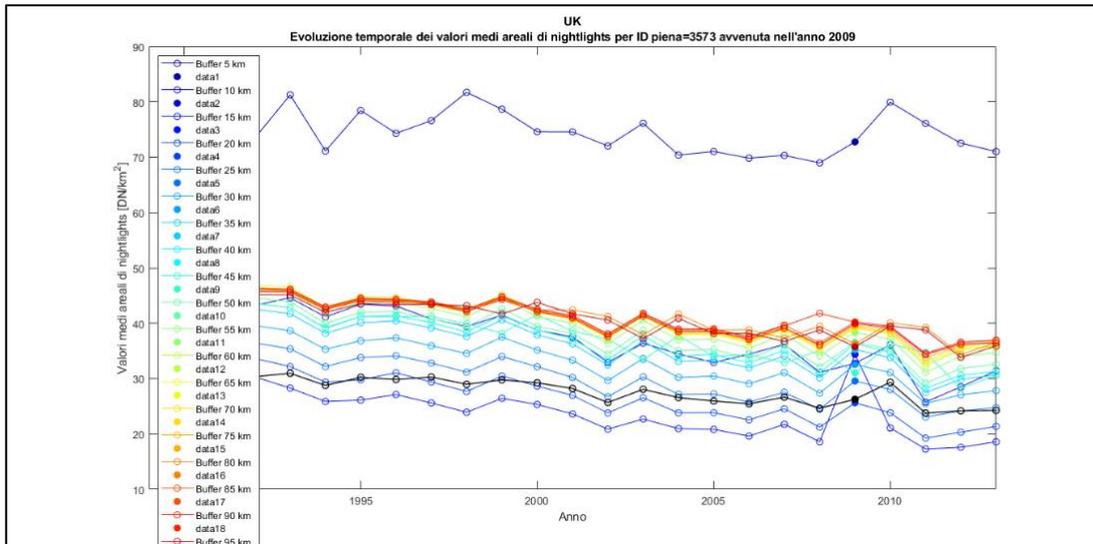


Figura 112. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3573 avvenuto nel 2009 nella regione di Yorkshire.

Passiamo adesso alla serie di eventi che si sono succeduti nelle Midlands, si tratta di un territorio posto fra Galles, Inghilterra del Nord, East Anglia ed Inghilterra del Sud: in pratica la zona centrale della Gran Bretagna, che a sua volta viene divisa in Midlands Orientali e Occidentali. La zona ad est comprende le contee del Derbyshire, Nottinghamshire, Lincolnshire, Leicestershire, Rutland e Northamptonshire; la zona ovest include Herefordshire, Staffordshire, Warwickshire, Worcestershire, West Midlands e Shropshire.

Studiando gli eventi in ordine cronologico, per primo si incontra quello con id: 677, dovuto ad uno straripamento del fiume Eye del 1992, con centroide ad una ventina di chilometri da Leicester.

L'evoluzione spaziale della tau-statistic presenta i seguenti andamenti (Figura 113):

- Il primo anno si registrano alcuni valori di tau-statistic leggermente negativi fino a 40 km di distanze di buffer, mentre successivamente si hanno dei risultati sempre positivi con i picchi più evidenti a tre e cinque anni dall'evento alluvionale, ad una distanza dal centroide di 15 km (rispettivamente i valori di tau-statistic ammontano a 39 e 63,6). Osservando la figura 114 si nota che per

gli anni appena citati, la densità di luminosità totale in Regno Unito è in diminuzione, dunque i picchi massimi stanno a indicare una dislocazione di popolazione.

- Oltre i cinque anni i valori di tau-statistic tornano a stabilirsi su valori positivi ma non troppo elevati (minori di 10), presentando andamenti quasi lineari per ogni anno.
- A distanze elevate non si notano grandi scostamenti, ad eccezione del terzo e quinto anno che continuano a mostrare delle tau-statistic maggiori rispetto a quelle degli altri anni.

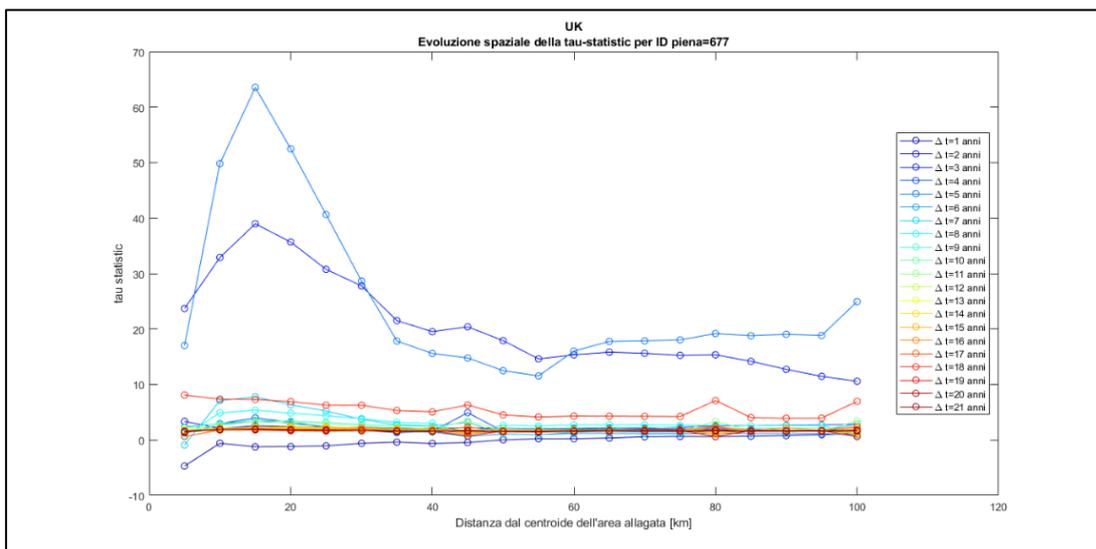


Figura 113. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:677 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.

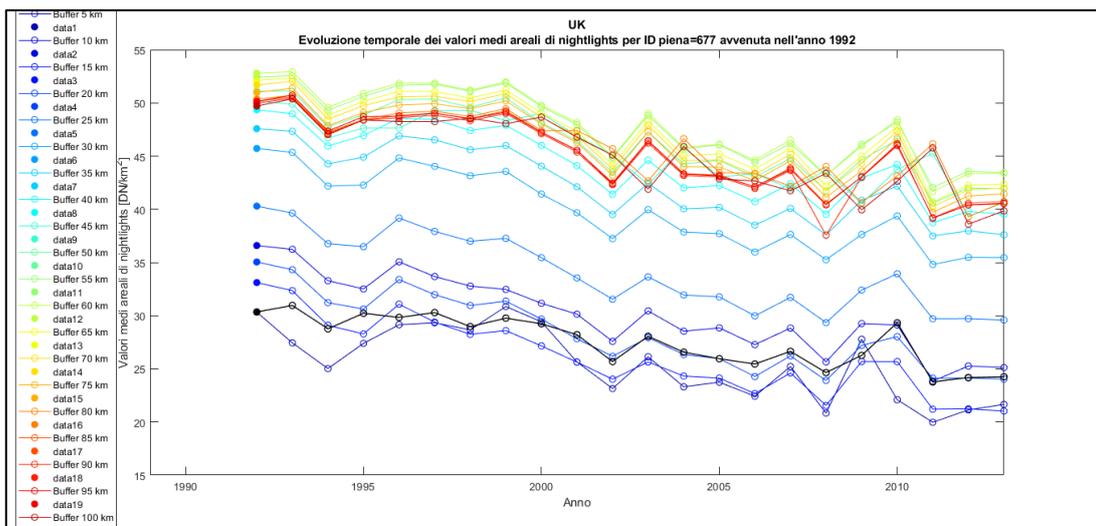


Figura 114. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 677 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.

Nel 1992, oltre a quella di Leicester, si incontra un'altra esondazione, con centroide spostato più a occidente, tra Birmingham e Leicester, nelle vicinanze del fiume Tame. Si tratta di uno dei corsi d'acqua maggiori delle Midlands Occidentali, nonché tributario del Trent. A causa del continuo aumento dei livelli delle acque sotterranee del bacino, esso è spesso teatro di alluvioni. Uno dei motivi scatenanti è che molte industrie tradizionali sono state sostituite da servizi più attenti ad un utilizzo cosciente della risorsa idrica e questo ha fatto sì che si prelevasse sempre meno acqua dalla falda sottostante il fiume, in una zona che però è sempre stata ricca d'acqua. Per prevenire il generarsi di fenomeni estremi, è stato previsto negli anni 80 un bacino di ritenzione delle acque piovane costruito grazie al prelevamento di ghiaia dal fondo del corso d'acqua. Nel 2005 sono stati promossi nuovi lavori volti a rallentare il flusso idrico e a creare habitat migliori per la flora e la fauna selvatica del Tame. Tuttavia, nel 2007, dopo l'avvento di intense precipitazioni sono esplose le sponde del fiume nell'area di Witton e Kingsbury Water Park, generando una nuova devastazione. Successivamente, dal 2008 al 2011, sono stati intrapresi nuovi programmi di miglioramento per un valore di centinaia di migliaia di dollari attraverso il dragaggio e l'eliminazione di alcuni ostacoli nel corso fluviale (River Tame, s.d.).

L'inondazione 697 del 1992 presenta un'evoluzione spaziale di tau-statistic (Figura 115) con le seguenti caratteristiche:

- Nel 1993, un anno dopo l'evento alluvionale, si nota una lievissima perturbazione della tau-statistic verso valori positivi tra i 10 km e i 15 km di distanza di buffer, poi si ristabilizza intorno allo zero. L'anno seguente, la tau-statistic si mantiene costante su valori nulli.
- Dai tre anni successivi alla piena in poi, si osservano dei valori bassi di tau-statistic, specialmente entro i 20 km dal centroide. Il minimo assoluto è raggiunto nel 1997 a 5 km di distanza di buffer (-98,7), subito dopo è evidente il minimo a tre anni dalla piena che si attesta con una tau-statistic pari a -59,1 sempre a 5 km dal centroide. Mentre a tre anni dalla piena i valori tendono a stabilizzarsi entro i 20 km, nel caso dell'andamento relativo al 1997, i valori si avvicinano allo zero solo oltre i 40 km dal centroide. I valori negativi evidenziati, tuttavia, rappresentano un aumento di densità di luminosità, poiché sia nel 1995 che nel 1997 la densità totale in Regno Unito è molto minore che nel 1992 (Figura 116). Dunque, si può affermare che oltre i tre anni dall'inondazione, si sia persa memoria dell'evento alluvionale.

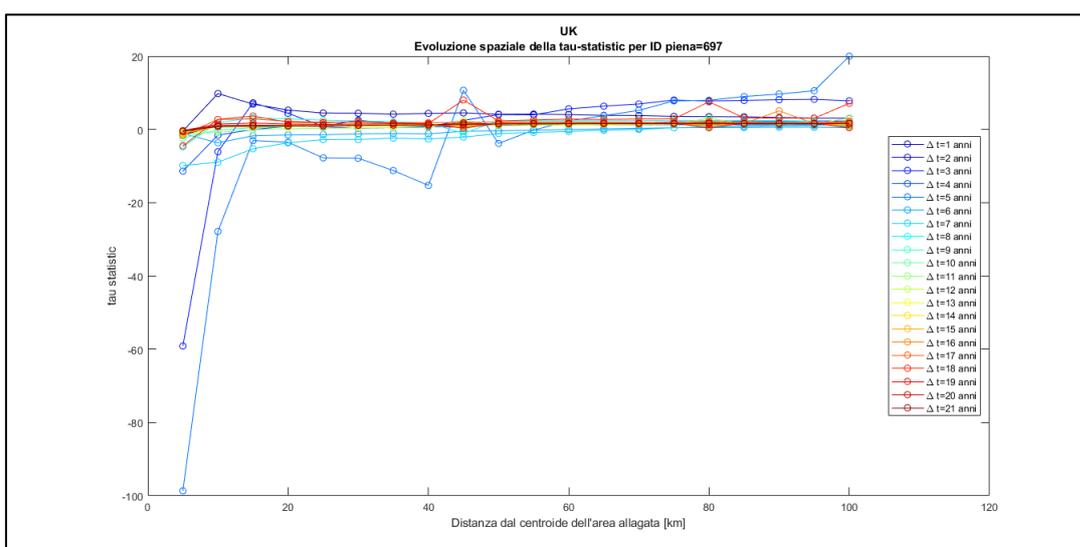


Figura 115. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:697 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.

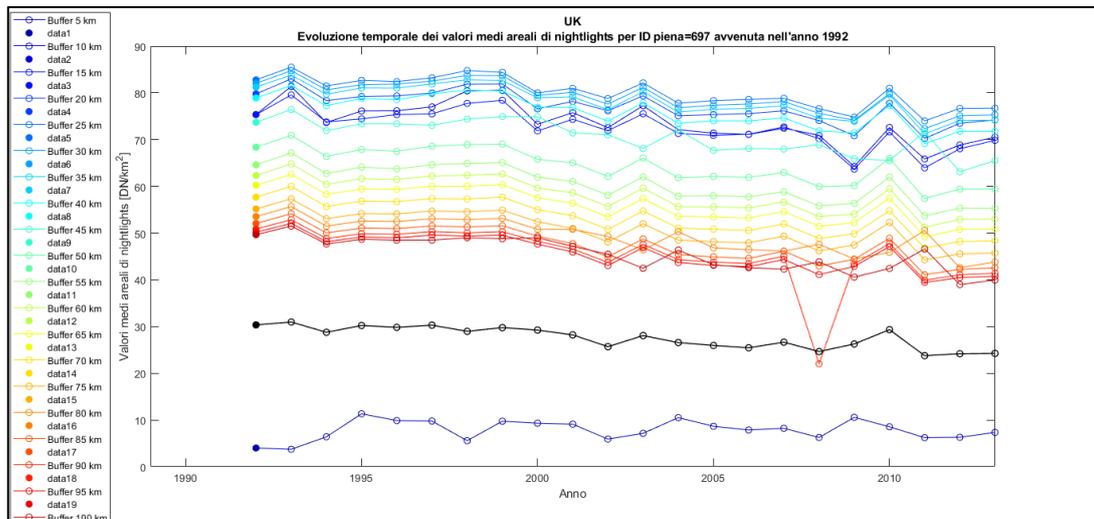


Figura 116. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 697 avvenuto nel 1992 nella regione delle Midlands.

Nel 1998 si verifica una piena in Northampton, nelle Midlands Orientali, che ha causato 5 morti e 300 sfollati coinvolgendo il fiume Nene. La causa fu una pioggia torrenziale nel mese di aprile, che raggiunse il picco il 10/04/1998, inondando la zona bassa di Northampton, Wellingborough ed altri insediamenti (Northamptonshire County Council, s.d.). In seguito, furono installati dei sistemi di allarme per avvertire i residenti nel caso si ripetessero alluvioni di questo genere e nel 2007 il governo britannico ha annunciato la spesa di sei milioni di dollari per la difesa idraulica di queste zone. Nel 2013, si verificò una nuova piena i cui effetti furono impediti grazie a tutte le misure di prevenzione che erano state implementate negli anni precedenti. Dall'evoluzione spaziale della tau-statistic per l'evento alluvionale (id: 1333) avvenuto nel 1998, risultano i seguenti andamenti (Figura 117):

- Nei buffer vicini al centroide (entro i 20 km) si nota un lieve aumento di tau-statistic il primo e il secondo anno dopo l'inondazione. In entrambi i casi i valori medi areali totali sono in aumento rispetto al 1998 (anno di avvento della piena), dunque anche la densità locale è in aumento.

- Per distanze maggiori si riscontrano andamenti interessanti da analizzare a due, tre e quattro anni dall'evento alluvionale: in tutti i casi si riscontrano dislocazioni della popolazione (nonostante gli andamenti discordanti della tau-statistic, dalla figura 118 si deduce che il denominatore della funzione sarà positivo per il secondo anno e negativo per il terzo e il quarto).
- Inoltre, i valori minimi assoluti si hanno a dodici anni dalla piena (variabili tra -16,9 e -8,7); in questo anno vi è un aumento di densità di luminosità totale in Regno Unito che fa sì che il denominatore della tau-statistic assuma valori positivi (si passa da un valore di densità di luminosità di 28,97 nel 1998 a 29,33 nel 2010).

In sostanza, a lungo termine è prevista una diminuzione spiccata di densità per tutti i buffer e tutti gli anni considerati.

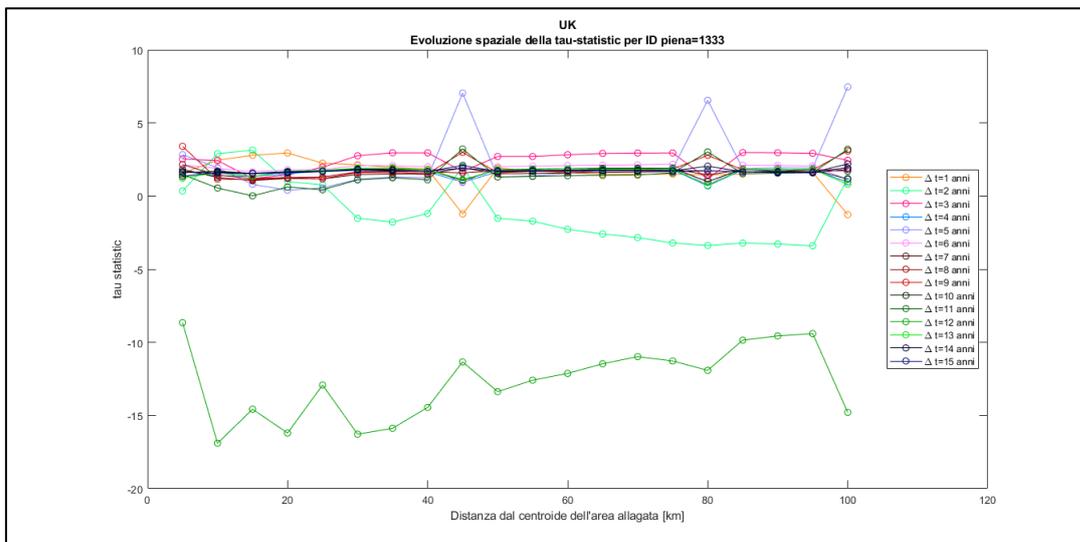


Figura 117. Evoluzione spatio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:1333 avvenuto nel 1998 nella regione delle Midlands.

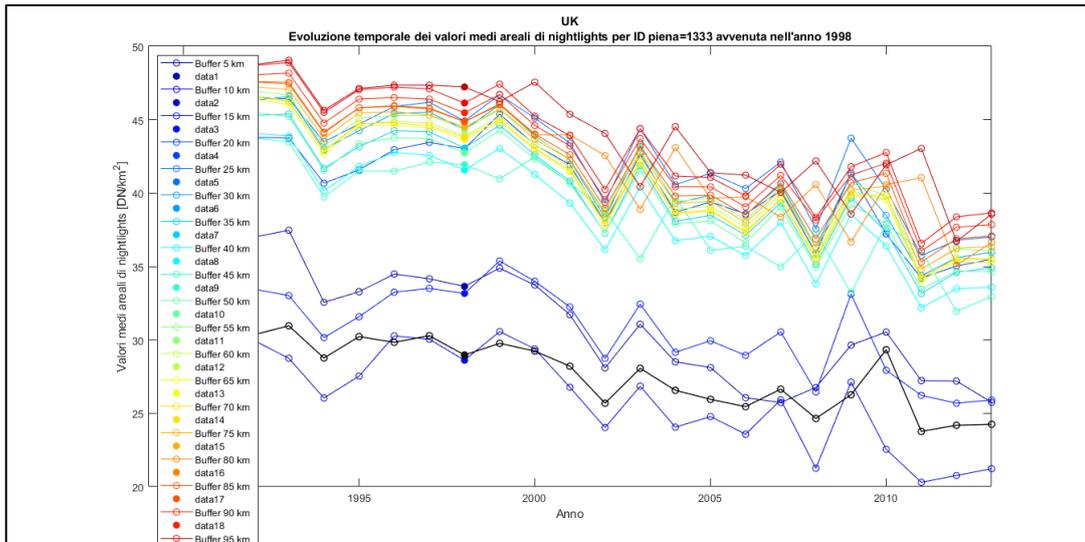


Figura 118. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1333 avvenuto nel 1998 nella regione delle Midlands.

Un altro evento di cui ci occupiamo è quello che nel 2000 colpisce la medesima zona, con centroide dell'area allagata collocato nella Rutland Water Reserve. Si tratta del lago artificiale più esteso dell'Inghilterra, che pompa acqua dal Nene e dal Welland, fornendo risorsa idrica alle Midlands Orientali.

L'evoluzione spaziale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 119):

- Non si notano andamenti rilevanti per i primi anni dopo l'evento alluvionale, ad esclusione di un lievissimo abbassamento di tau-statistic entro i 10 km dal centroide.
- Solo la spezzata relativa ai dati del 2010 (10 anni dopo l'evento alluvionale) si discosta dalle altre: essa prevede valori sempre negativi ad eccezione del primo a 5 km, in cui è previsto un aumento di densità locale. I minimi più evidenti si trovano invece a 45 km, 80 km e 100 km. Dalla figura 120 si nota che la densità totale in Regno Unito è sempre in diminuzione rispetto al 2000, tranne che per il 2010, anno in cui si verifica un lieve aumento di luminosità. Dunque, si può dedurre che il motivo del massimo a 5 km nel 2010 è dovuto ad un aumento rilevante di densità locale di luminosità; al contrario, il fatto

che questo picco si trasformi in un minimo per gli altri buffer, si attribuisce ad una diminuzione di densità locale per distanze più elevate dal centroide.

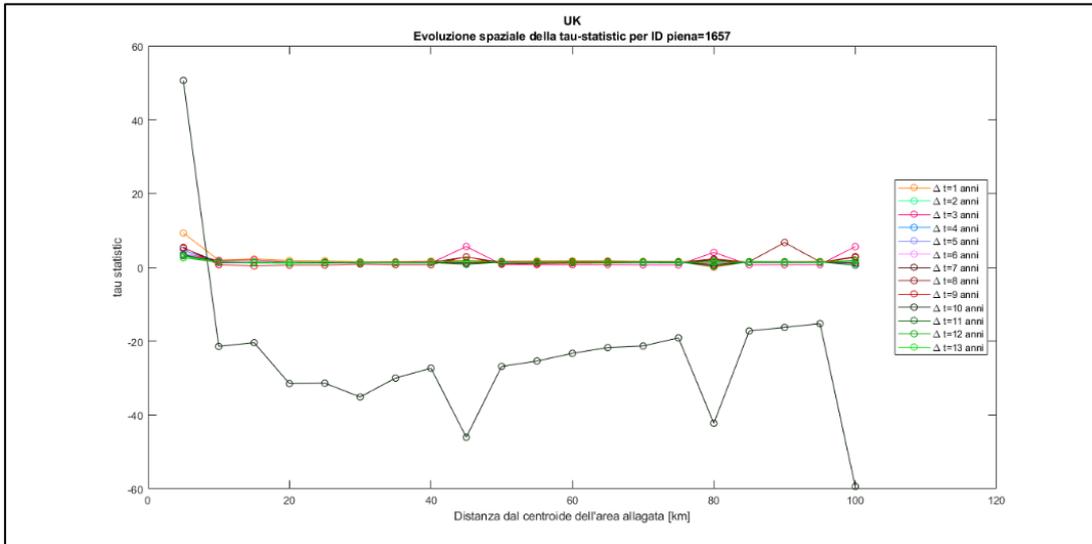


Figura 119. Evoluzione spaziale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:1657 avvenuto nel 2000 nella regione delle Midlands.

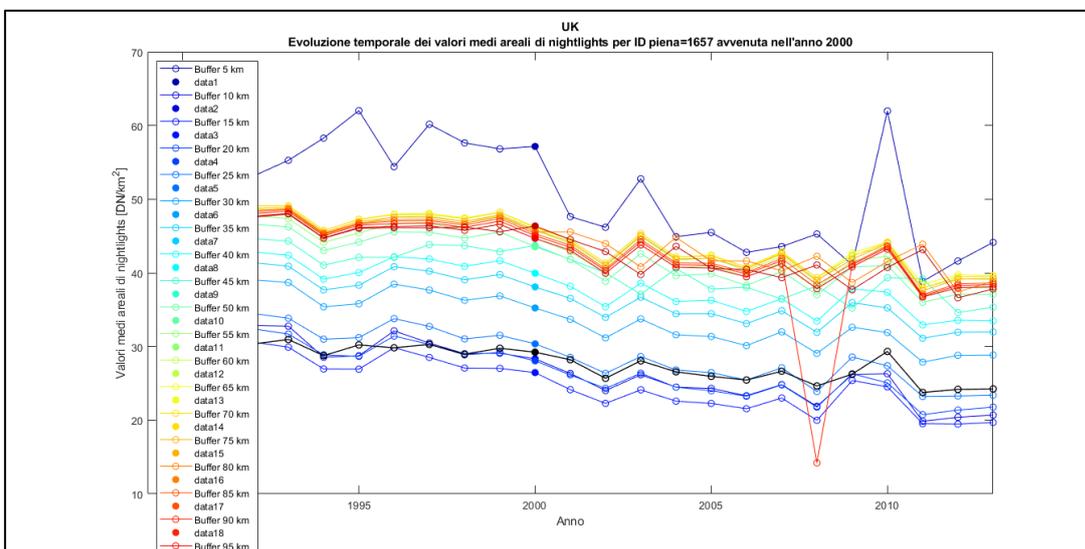


Figura 120. Evoluzione spaziale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1657 avvenuto nel 2000 nella regione delle Midlands.

L'ultimo evento che tratteremo nelle Midlands, ha avuto origine nel 2008 dalla contea di Derbyshire, a poco più di dieci chilometri dalla cittadina di Derby, a seguito di un'intensa pioggia. L'evoluzione spaziale della tau-statistic mostra i seguenti andamenti (Figura 121):

- Il primo anno dopo l'evento alluvionale si nota un picco massimo (20,3) entro i 20 km di distanza di buffer; anche negli anni successivi sono previste alcune oscillazioni positive nelle vicinanze del centroide. Dal grafico dei valori medio areali (Figura 122) possiamo verificare cosa succede a 15 km l'anno successivo alla piena: c'è un aumento di densità locale, oltre che un aumento di densità totale nel Paese. Inoltre, si evince che la densità di luminosità nel Regno Unito, rispetto al 2008, cresce per i primi due anni e poi tende a diminuire per gli altri tre. Perciò, oltre i due anni, gli andamenti delle tau sono inversi rispetto a quelli delle densità.
- Infatti, a distanze maggiori si osservano degli scostamenti negativi per uno e due anni dall'evento alluvionale e positivi per quattro e cinque anni dopo, a distanze di buffer di 45 km, 80 km e 90 km. Secondo quanto visto al paragrafo precedente, tali andamenti indicano una diminuzione della popolazione per i picchi osservati, forse a causa delle frequenti *flash floods* che si succedono in quel periodo e in queste zone (cfr. Dartmouth Flood Archive, id: 3329, 3376 con gradi di severità minori di 2).

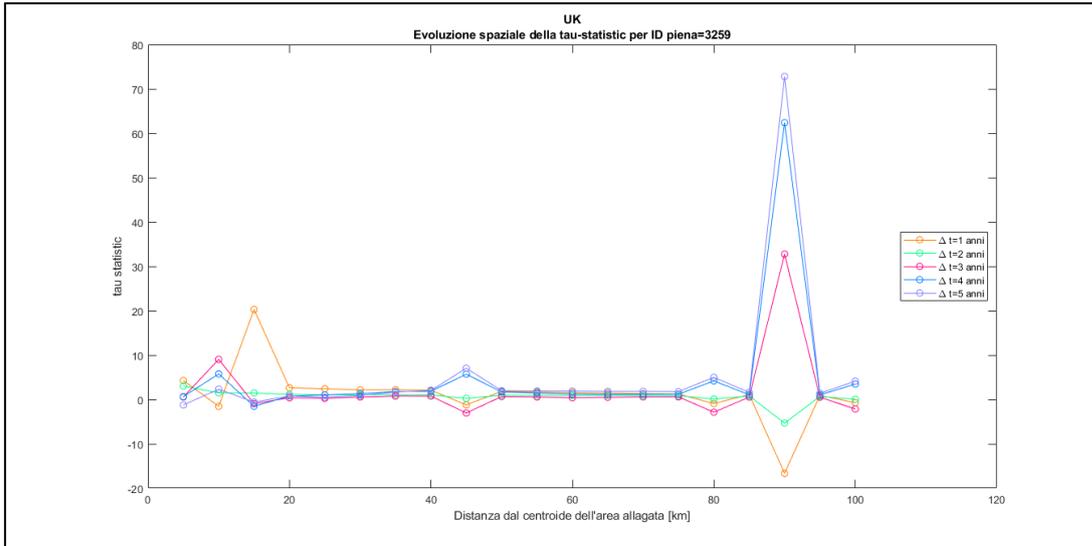


Figura 121. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id:3259 avvenuto nel 2008 nella regione delle Midlands.

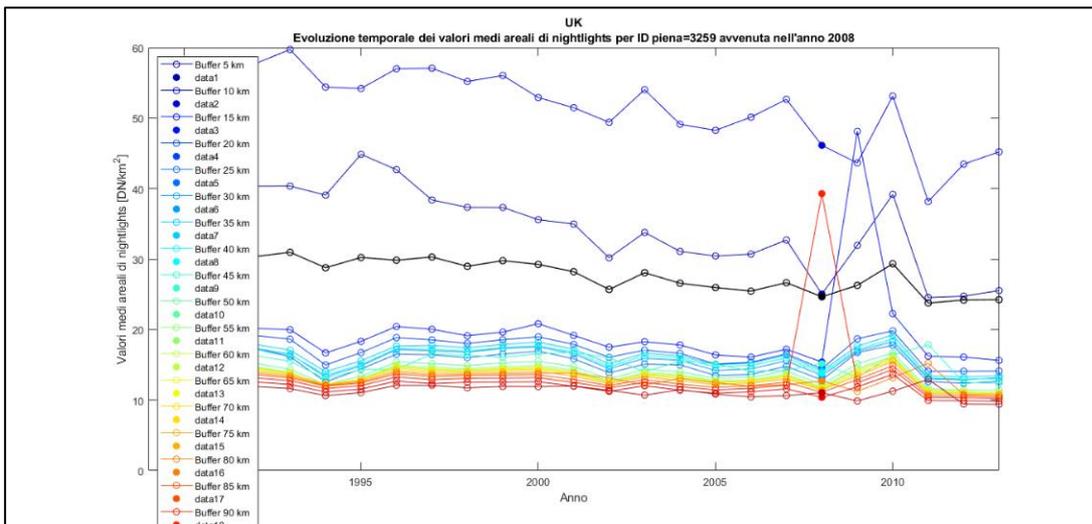


Figura 122. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 3259 avvenuto nel 2008 nella regione delle Midlands.

Gli ultimi due eventi alluvionali di cui ci interessiamo sono avvenuti in zone distinte da quelle trattate finora. L'inondazione con id: 1816 risale al 21 ottobre 2001 e il centroide è localizzato nella regione dell'Essex, a ridosso del fiume Stour, che segna il confine tra Suffolk ed Essex. Considerando l'evoluzione spazio-temporale in figura 123, si deducono le seguenti caratteristiche:

- Il primo anno dopo l'evento alluvionale non appare nulla di rilevante, mentre si rileva un comportamento altalenante di tau-statistic durante l'anno 2003. Si osservano dei picchi positivi per buffer di 45 km, 80 km e 100 km (con valori tra i 22 e i 25) ed un minimo assoluto a 15 km dal centroide (circa -16).
- Nel 2010, per gli stessi buffer in cui nel 2003 comparivano dei massimi, si notano invece dei minimi. In realtà, tutti i picchi corrispondono a delle diminuzioni di densità locale, la ragione dell'andamento opposto sta nel fatto che mentre nel 2003 la densità totale è in diminuzione, per l'anno 2010 essa è in aumento rispetto all'anno dell'evento di piena (Figura 123). In realtà la densità di luminosità totale in Regno Unito diminuisce sempre rispetto al 2001, ad eccezione del 2010, in cui aumenta. Perciò a nove anni dalla piena l'andamento di tau rispecchia anche la densità: per valori positivi di tau c'è aumento di luminosità e viceversa per valori negativi una diminuzione. Si evidenzia una crescita di densità specialmente per distanze di 20-40 km. Differentemente, nel 2003 accade che laddove la tau assume valori positivi ho diminuzione di densità e viceversa.

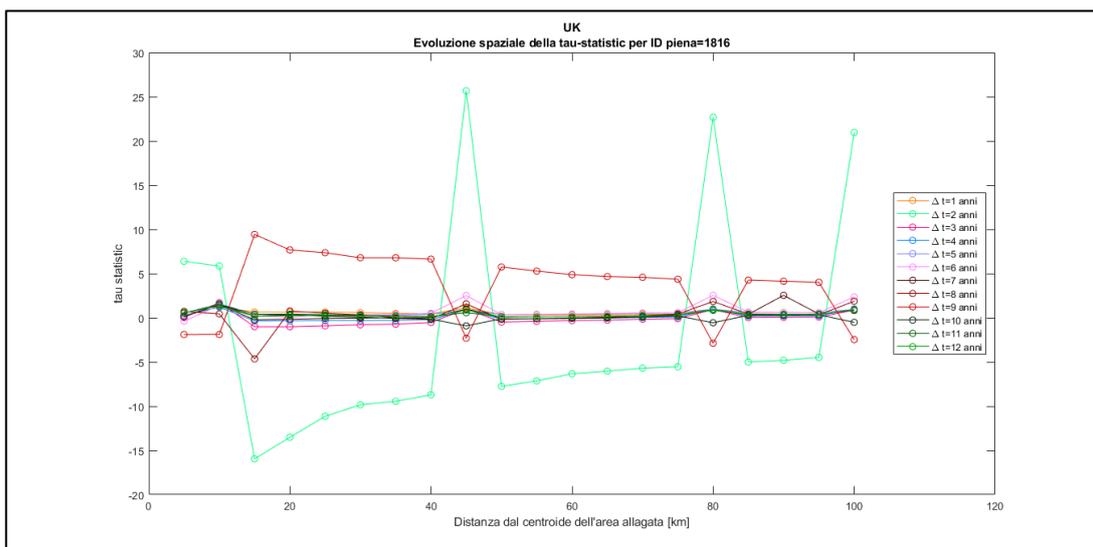


Figura 123. . Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 1816 avvenuto nel 2001 in Cornovaglia.

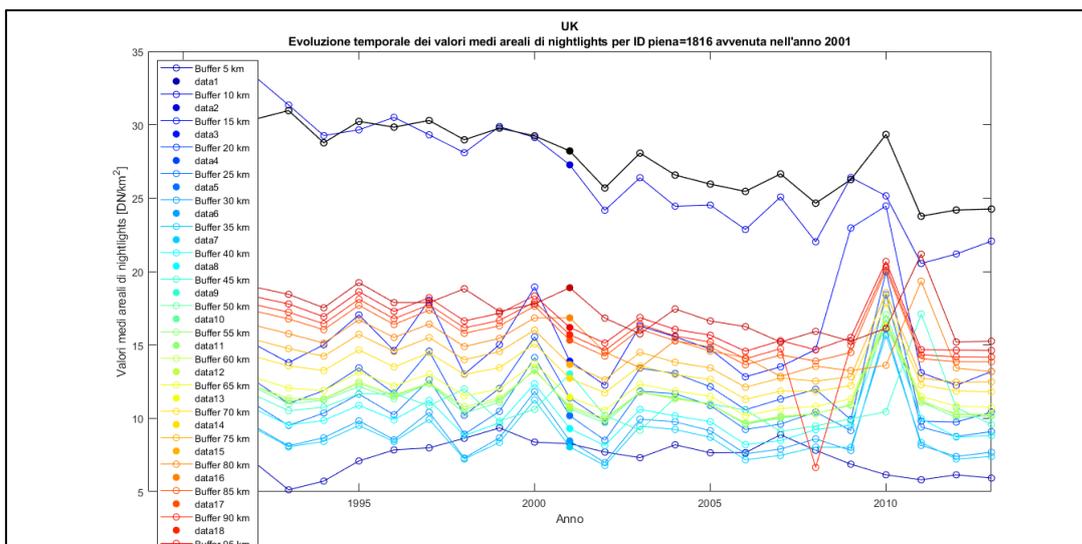


Figura 124. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 1816 avvenuto nel 2001 in Essex.

L'ultimo evento estremo coinvolge la zona di Lesnewth, in Cornovaglia, precisamente la valle di Valency, una valle ripida e boscosa in cui scorre l'omonimo fiume. Nel 2004 l'area è stata inondata a causa dell'erosione del canale del Valency, in particolare in prossimità del villaggio di Boscastle. Il 16 agosto 2004, il sopraggiungere di forti temporali ha lesionato molti edifici e generato un'alluvione con grado di severità pari a 2 (id: 2549).

Dall'evoluzione spaziale di tau-statistic si notano le seguenti caratteristiche (Figura 125):

- Entro i 10 km di distanza di buffer si nota un aumento di tau-statistic, poi i valori si stabiliscono sullo zero. A due anni dall'evento alluvionale (2006), non si notano scostamenti di interesse, mentre a tre anni si ha una netta diminuzione di tau-statistic, che assume sempre valori negativi per tutti i buffer. Dall'osservazione della figura 126 si evince che questo risultato dipende da una dislocazione di popolazione, che tende a spostarsi dalle zone in esame.

- Nel 2009, a cinque anni dall'evento di piena, la tau-statistic risulta sempre positiva, ad eccezione del caso relativo alla distanza di buffer di 15 km. Anche stavolta il motivo è una diminuzione di popolazione (sia a livello locale che totale) che fa sì che la funzione statistica assuma segno positivo. L'eccezione di 15 km è giustificata da un aumento di densità locale di luminosità visibile in figura 126.
- A distanze maggiori non si notano altri scostamenti di interesse. Inoltre, nel 2010 avviene un altro evento alluvionale in Cornovaglia a circa 70 km di distanza (cfr. Flood Archive, id: 3749). Perciò, è possibile che l'aumento di densità di luminosità locale che si manifesta in quell'anno (Figura 126), soprattutto per buffer a elevata distanza, sia legato alla popolazione sfollata da quelle zone e insediata nelle zone in esame.

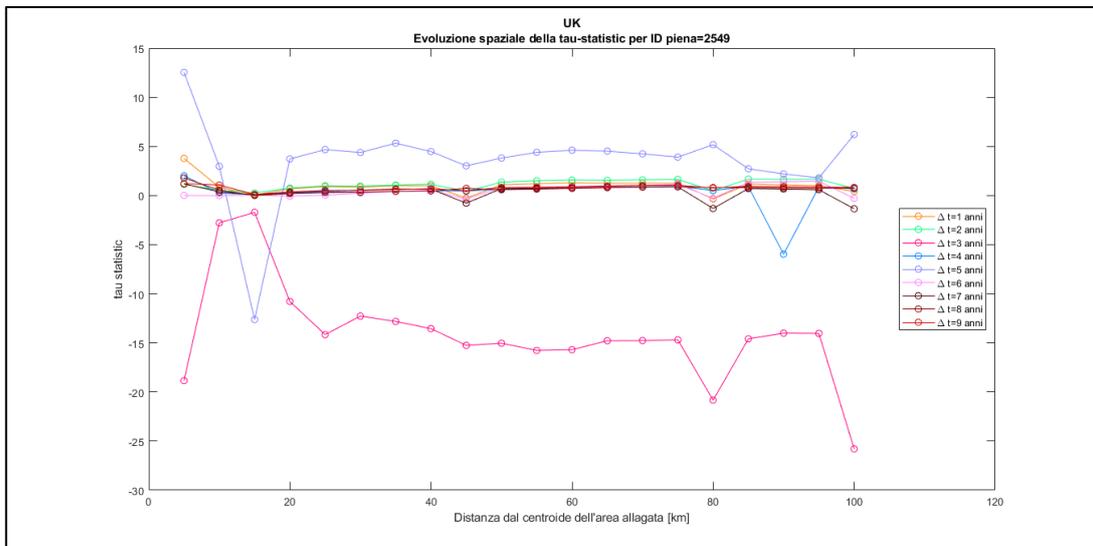


Figura 125. Evoluzione spazio-temporale della tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2549 avvenuto nel 2004 in Cornovaglia.

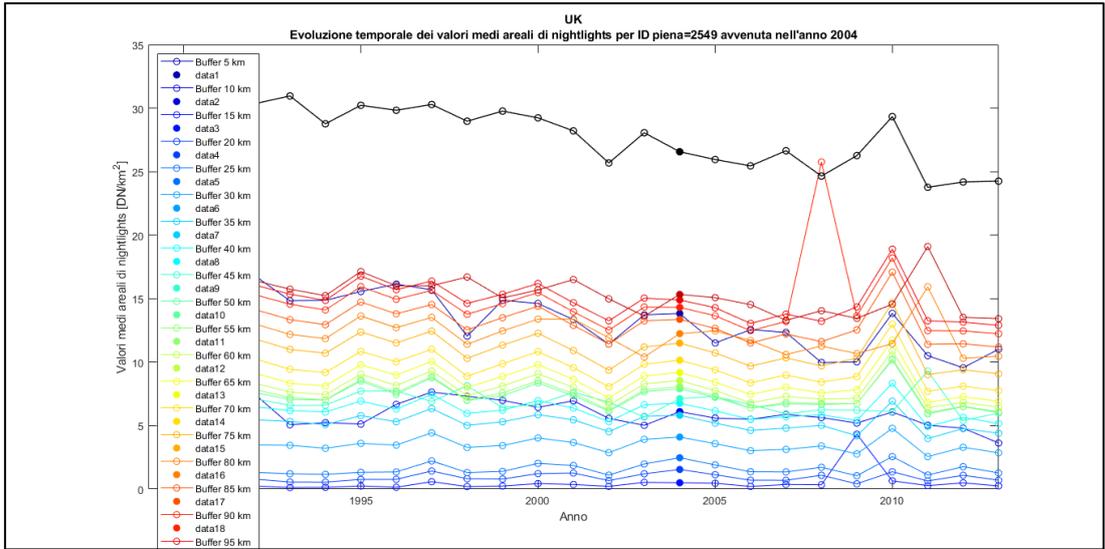


Figura 126. Evoluzione spazio-temporale dei valori medio areali della densità di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2549 avvenuto nel 2004 in Cornovaglia.

Galles

Il Galles forma un aggetto peninsulare, bagnato dal Mare d'Irlanda a Nord, dal Canale di Bristol a Sud e dal Canale di San Giorgio a Ovest; ad Est invece confina amministrativamente con l'Inghilterra (3° meridiano Ovest) (Figura 127).

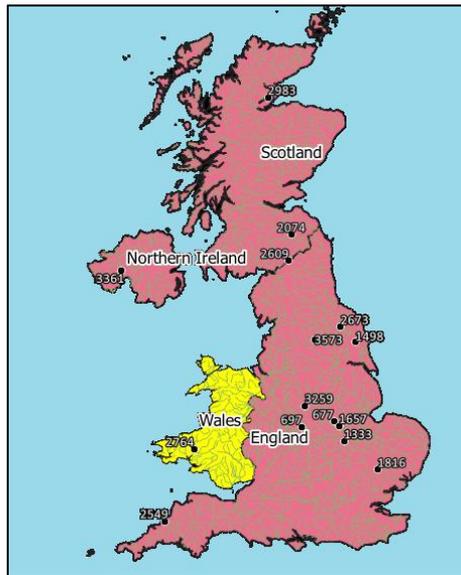


Figura 127. Localizzazione del Paese Galles.

Il territorio è essenzialmente montuoso e presenta la catena dei Monti Cambrici con vette che superano 1000 metri di altitudine.

L'idrografia assume una struttura a raggiera asimmetrica con fiumi di notevole lunghezza in direzione orientale, che deviano verso Sud o Nord, per riversarsi rispettivamente nel Canale di Bristol o nel Mare d'Irlanda.

L'unico evento alluvionale che tratteremo in Galles è quello con id: 2764 (2004), nella contea del Carmarthenshire (Figura 128).

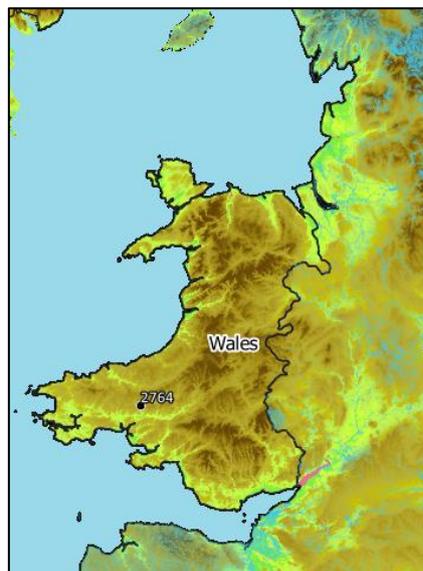


Figura 128. Localizzazione degli eventi alluvionali in Galles.

L'alluvione, che coinvolge tutta la valle di Boscastle, si è verificata a causa di una significativa erosione del canale dovuta a intense piogge durate per sette ore. Dall'evoluzione spazio-temporale della tau-statistic si osservano le seguenti caratteristiche (Figura 129):

- Il primo anno dopo l'inondazione si osserva un piccolo aumento di tau-statistic che da valori negativi si stabilizza su valori nulli entro i 15 km di buffer. Il secondo anno invece si ha una diminuzione di tau-statistic che da un valore di circa 10,2 si stabilizza sullo zero, anch'essa entro i 15 km di distanza di buffer. Dalla figura 130 però, si nota che la densità totale in Regno Unito

decrese nel 2006 mentre cresce nel 2007 se paragonata a quella dell'anno di avvento dell'alluvione (2005). Il che vuol dire che in entrambi i casi la densità di luminosità locale è in aumento entro i 15 km dal centroide.

- Nel 2008, il terzo anno dopo la piena, non si evidenzia nessuno scostamento dallo zero, se non a 85 km di buffer, dove si presenta un minimo molto evidente (-36,8). Nel grafico dei valori medi areali (Figura 130) appare in corrispondenza del 2008 a 85 km di buffer un massimo (mentre è la densità totale che è in diminuzione e che conferisce alla funzione statistica il segno negativo). A 5 anni dall'evento alluvionale (2010) si hanno ancora degli andamenti di tau-statistic interessanti: fino ai 50 km di distanza di buffer essa assume valori negativi (a partire da -21 a 5 km), che tendono a stabilizzarsi con l'aumentare della distanza dal centroide. Dalla figura dei valori medi areali si denota che, nell'anno 2009, la densità di luminosità totale in Regno Unito è in aumento (il denominatore della tau-statistic è positivo) e quindi valori negativi di tau-statistic indicano dislocazioni della popolazione.

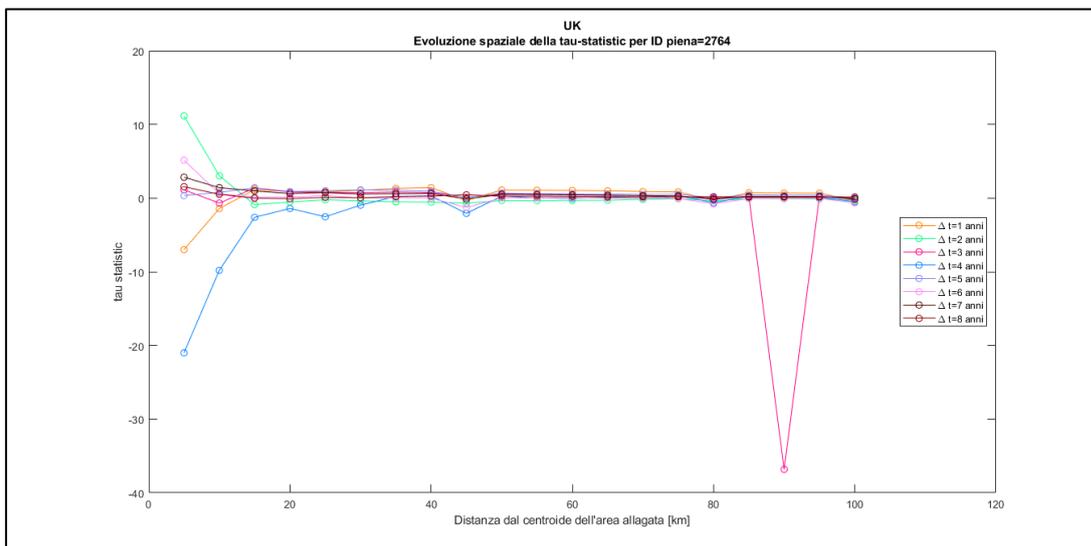


Figura 129. Evoluzione spazio-temporale di tau-statistic per l'evento alluvionale id: 2764 avvenuto nel 2005 in Galles.

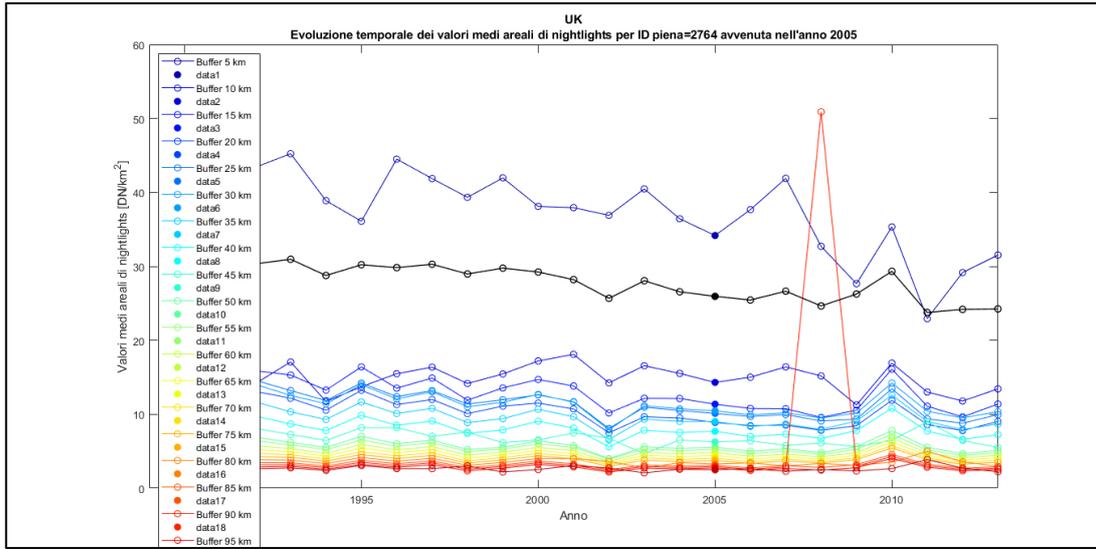


Figura 130. Evoluzione spazio-temporale dei valori medi areali di luminosità notturna artificiale per l'evento alluvionale id: 2764 avvenuto nel 2005 in Galles.

5. Conclusioni

Il presente elaborato di prova finale è stato indirizzato all'analisi dell'evoluzione spazio-temporale della popolazione in relazione ad eventi alluvionali. Da un recente studio è emerso che tra tutti le catastrofi naturali legate ai cambiamenti climatici, le inondazioni sono quelle più frequenti. Inoltre, esse costituiscono il disastro naturale che colpisce il maggior numero di individui nel mondo ed in grado di provocare le più ingenti perdite economiche. Basti pensare che tra il 1980 ed il 2011, si contano 5,5 miliardi di individui sottoposti a rischio alluvionale e circa 90 miliardi di euro di perdite dirette dovute a questo genere di eventi (Centre for Research and Epidemiology of Disaster, 2018).

L'analisi è stata effettuata considerando i dati medio-areali di luminosità notturna artificiale, sia a livello locale che nazionale; questi valori sono stati utilizzati per il calcolo della funzione statistica "tau-statistic", che costituisce lo strumento di base utilizzato per l'interpretazione dei risultati.

Gli Stati protagonisti dello studio sono stati scelti in funzione di 4 indicatori, calcolati sulla base delle informazioni relative alle alluvioni verificatesi tra il 1992 e il 2013 e fornite del Dartmouth Flood Archive. A tal fine è stata redatta una classifica basata su: densità di popolazione di ogni Stato, numero degli eventi alluvionali avvenuti in ciascuno di essi, estensione totale dell'area alluvionale e durata di ogni evento di piena. Ad ognuno di questi elementi è stato attribuito un certo peso sfruttando la teoria della "Weibull Plotting Position" e tra i paesi potenzialmente papabili per lo studio, ne sono stati selezionati due, uno in via di sviluppo ed uno economicamente sviluppato: India e Regno Unito.

Le coordinate del centroide di ogni area alluvionata, fornite sempre dal Dartmouth Flood Observatory, costituiscono il punto da cui sono stati generati dei buffer circolari mediante il software QGIS. Essi si estendono da 5 km a 100 km di distanza dal centroide, con passo di 5 km. All'interno delle aree così ottenute, sono state

effettuate delle “statistiche zonali” sfruttando dei dati di luminosità notturna artificiale. Queste informazioni sono rese disponibili grazie a NOAA, Nasa e Dipartimento della Difesa dal '92, motivo per cui la nostra analisi inizia dallo stesso anno. Esse sono assimilabili a indicatori di livello di sviluppo urbano e conseguentemente a valori di popolazione, poiché attribuiscono un grado di luminosità (da 0 a 63) ad ogni pixel di un'immagine raster geolocalizzata. I risultati sono stati sfruttati per calcolare i valori medi areali di luminosità notturna artificiale: la somma dei valori di luminosità dei pixel interni ad ogni buffer è stata divisa per l'area di quest'ultimo. La stessa operazione è stata eseguita per le somme totali dei valori di luminosità notturna, rispettivamente in India e Regno Unito, che sono state divise per le rispettive aree.

Successivamente, mediante un codice Matlab, si è calcolata la funzione tau-statistic, che è servita per analizzare la variabilità spazio-temporale dei cluster abitativi. L'originalità della ricerca presentata è dovuta principalmente a questo: l'utilizzo di una funzione statistica che finora era stata sfruttata esclusivamente per studi epidemiologici e che, a valle dell'analisi svolta, si è rivelata abbastanza efficace anche in caso di eventi alluvionali.

Confrontando i risultati ottenuti per India e Regno Unito, il primo aspetto che risulta evidente è che vi è una differenza nei valori medi di tau-statistic. Nel caso dell'India si osservano delle quantità generalmente maggiori rispetto a quelle registrate in Regno Unito: questo aspetto sta ad indicare che nel primo caso di studio sono previste dislocazioni e rilocalizzazioni di popolazione più frequenti e di maggiore entità rispetto al Regno Unito. Lo studio ha rivelato che per la maggior parte degli eventi localizzati in India, c'è una tendenza ad allontanarsi dalle zone alluvionate entro i primi due anni dall'evento di piena e nelle vicinanze del centroide. Al contrario, la popolazione britannica difficilmente si sposta dalle proprie zone abitative, preferendo la sedentarietà. Questa propensione è legata soprattutto alla differenza di sviluppo socio-economico tra i due Paesi. Naturalmente, la conoscenza di topografia, geologia, uso del suolo, idrologia e demografia, assieme ad una precisa valutazione delle implicazioni legate alle inondazioni, è alla base

dell'implementazione di buone misure di protezione e gestione del rischio. L'India è più estesa e più colpita da eventi alluvionali rispetto al Regno Unito, tuttavia, detiene delle possibilità economiche nettamente inferiori. Ciò si traduce in una sostanziale differenza tra misure precauzionali, assistenziali e di soccorso previste nei due Paesi. La conseguenza principale è che molti indiani sono costretti a sfollare dalle loro case e ad abbandonare le zone alluvionate, in cerca di una nuova pace. Al contrario, c'è anche da dire che per natura il popolo indiano è sicuramente più nomade rispetto a quello britannico, il che rende il fenomeno dell'emigrazione in India meno traumatico e più frequente.

Un'altra caratteristica che si può osservare dai risultati mostra come gli abitanti indiani perdano memoria della piena a lungo termine, mentre nel caso del Regno Unito i valori di tau-statistic tendono a stabilizzarsi molto prima, quasi immediatamente dopo l'alluvione. A riprova di ciò, si nota che le evoluzioni delle tau-statistic relative ad eventi alluvionali indiani mostrano degli andamenti molto altalenanti al variare dei buffer e non seguono schemi particolarmente rigidi. I grafici previsti per le alluvioni britanniche invece, mostrano delle variazioni che seguono andamenti oscillanti al trascorrere dei vari anni (a causa dei valori poco stabili della luminosità media areale in Regno Unito), ma sostanzialmente simili per tutti i buffer. Questa prerogativa conferma gli aspetti descritti in precedenza: in Regno Unito la tendenza della popolazione a spostarsi dall'area alluvionata è molto più trascurabile che in India e la stabilizzazione delle tau-statistic avviene in tempistiche differenti: in India la popolazione tende a perdere memoria degli eventi avvenuti dopo mediamente 5 anni. In Regno Unito, poiché non si accusano spostamenti di popolazione rilevanti, questo aspetto non è altrettanto visibile.

Le inondazioni colpiscono circa 520 milioni di persone ogni giorno, mettendo in pericolo 25000 vite in tutto il mondo e causando perdite economiche tra i 50 ed i 60 miliardi ogni anno (Van Alphen, et al., 2011). Perciò, è essenziale gestire il rischio alluvionale in modo appropriato ed efficace. Per il momento questo obiettivo sembrerebbe esser stato raggiunto in Regno Unito, specialmente in Inghilterra e

Galles, dove è stata implementata una strategia (FCERM¹⁰) che prevede una stretta collaborazione tra organizzazioni, enti e comunità. Gli obiettivi fondamentali sono quelli di proteggere la popolazione e le loro proprietà, far sì che i cittadini comprendano e siano coscienti dei rischi che corrono, facendo in modo di rispondere prontamente agli eventi alluvionali ed alle erosioni costiere. Lo scopo finale è quello di stabilire un approccio che dia più potere ai singoli individui ed all'autorità locale, che investa in azioni che possano avvantaggiare il popolo più esposto, che eviti lo sviluppo in aree a rischio e migliori la gestione di previsioni e soccorsi. Tutti questi aspetti andrebbero integrati mantenendo la sostenibilità al centro dell'azione, lavorando in armonia con la natura e a favore dell'ambiente.

In India, la situazione è ben differente: più di 40 milioni di ettari di territorio indiano è considerato ad altissimo rischio alluvionale (National Disaster Management Authority Government of India, 2008), per cui sarebbero richieste strategie di difesa efficaci ma un paese in via di sviluppo deve fare i conti con svariate mancanze. L'India non detiene modelli digitali di elevazione per elaborare mappe di previsione, né sensori sugli alvei fluviali che comunichino in tempo reale gli stati di allerta. Non esistono misure precauzionali, né documentazioni sufficienti riguardo i potenziali impatti delle alluvioni sul territorio. I serbatoi esistenti sono sfruttati senza tener conto dell'aspetto di mitigazione degli eventi di piena, anche perché mancano previsioni sull'afflusso che potrebbero generare o trattenere. Infine, è da considerare la mancata partecipazione della popolazione, che si trova spesso impreparata di fronte ad un evento estremo, rischiando anche di sottovalutarlo. È di fronte a tutti questi limiti che durante la Conferenza delle Nazioni Unite sullo Sviluppo Sostenibile (*"The future we want"*, Rio De Janeiro, 2012), il Segretario si esprime in tal modo: "Siamo profondamente preoccupati che tutti i paesi, soprattutto quelli in via di sviluppo, siano vulnerabili agli effetti negativi dei cambiamenti climatici e stiano già sperimentando maggiori impatti". Difatti, un sistema altamente vulnerabile è molto più sensibile, limitando la capacità e la ripresa della popolazione. Pertanto, è necessario che nelle zone più povere e più esposte ad eventi alluvionali, si

¹⁰ Flood and coastal risk management strategy for England.

incrementino le strategie d'azione volte alla gestione del rischio ed al pronto intervento, affinché si scongiurino vittime, ferite e sfollati.

A questo proposito c'è da dire che spesso accade che la risonanza mediatica di un evento alluvionale, non sia legata tanto alla sua severità oggettiva, ma piuttosto all'identità delle vittime ed alla loro relazione con i lettori. Gli editori britannici hanno ammesso che la presenza di connazionali tra le vittime di un disastro, sia un elemento considerato per giudicarlo mediaticamente interessante o meno. Perciò, le vittime di eventi che coinvolgono altri Paesi come India, Pakistan o Indonesia, sono descritte come se fossero appartenenti ad una società "distante ed esotica". Al contrario, i morti in seguito ad eventi estremi che colpiscono i Paesi occidentali, sono considerati alla stregua di familiari, con stili ed esperienze di vita comuni a quelle del lettore. In questo modo viene automaticamente diminuita la risonanza mediatica di questi fenomeni nei paesi in via di sviluppo, perciò per questi territori risulterà ancor più difficile ricevere investimenti e costruire misure di difesa efficaci.

Studi storici sulla risposta della popolazione in seguito ad eventi alluvionali possono costituire un punto di partenza valido per pianificare un efficiente percorso di transizione verso nuove strategie di mitigazione. Queste ultime dovranno prevedere una mobilitazione dei vertici e contemporaneamente l'impegno del singolo cittadino, che dovrà informarsi ed applicarsi al fine di sviluppare una propria coscienza. In questo modo gli sarà garantito un certo grado di preparazione e prontezza di fronte ad un potenziale evento estremo.

6. Appendice

6.1 Approfondimento: il codice Matlab

La prima cosa da fare dopo aver aperto un nuovo script è caricare i dati che ci serviranno nella scrittura dei comandi. Grazie alla metodologia QGIS, abbiamo potuto generare alcune tabelle che saranno caricate su Matlab mediante il comando *xlsread*. La tabella che denomineremo TOT_LUCI è costituita da due righe: nella prima figurano gli anni dal 1992 al 2013; nella seconda compaiono i dati totali di luce del paese (India o Regno Unito) per ciascun anno, che sono stati ottenuti dalle mappe di luminosità notturna artificiale.

Poi caricheremo la tabella PIENE_ANNI, che associa ad ogni codice identificativo della piena, l'anno in cui essa è avvenuta. Infine, avremo bisogno delle tabelle in cui ogni riga corrisponde ad una piena diversa, mentre sulle colonne ritroviamo la somma dei dati di luminosità notturna per ogni anno ad una certa distanza di buffer, ad esempio 5 km.

Dopo aver inserito tutte le tabelle nel Workspace, si possono anche definire le varie righe e colonne di ognuna di queste. Nello specifico ci servirà definire: la colonna con i codici delle piene, la riga di anni dal 1992 al 2013 e la colonna in cui sono indicati gli anni di avvento delle piene, che può essere trasposta utilizzando un apice in modo da generare un vettore.

In seguito, tramite una procedura piuttosto agevole si procederà a caricare tutte le tabelle relative ai dati di luminosità interni ai vari buffer. Infine, si caricherà la tabella delle aree dei buffer calcolate in QGIS e il valore di superficie totale del paese.

A questo punto, dopo aver normalizzato le somme delle luminosità notturne secondo la procedura spiegata al capitolo 3.3, si richiede che si scriva un ciclo *for*, poiché i calcoli che vogliamo effettuare dovranno partire dall'anno in cui la piena è avvenuta (specificato nel vettore "anni_piene"); dunque, si dovrà far in modo che il programma associ, a ciascun evento, l'anno in cui quest'ultimo è avvenuto e che poi siano eseguiti

i calcoli ripetutamente, a partire da quell'anno sino al 2013. Utilizziamo a questo scopo la funzione *find* che definisce qual è la posizione dell'anno di interesse tra 22 posizioni, che corrispondono agli anni scritti in successione dal 1992 al 2013. Una piena avvenuta nel 1993, ad esempio, sarà associata ad una posizione due, mentre una avvenuta nel 2011 ad una posizione 20.

Poi si può procedere al calcolo delle tau-statistic così come indicato nel capitolo 3.2.1. Chiaramente il risultato del calcolo, ossia la tau, avrà sembianze matriciali: stiamo effettuando i calcoli su tutte le piene disponibili (che troveremo su ciascuna riga) e per i vari anni dal 1992 al 2013 (che compaiono invece sulle colonne). A titolo esemplificativo, per una piena avvenuta nel 1992, avremo dati nelle matrici a partire dall'anno successivo a quello appena menzionato. In quella posizione troveremo un numero che coincide con la differenza tra la densità di luminosità presente (entro una certa distanza di buffer) tra il 1993 e il 1992, rispetto alla differenza di densità di luminosità totale del Paese sempre tra i medesimi anni.

Gli step successivi riguardano l'elaborazione dei grafici; il comando atto ad aprire una finestra grafica è *figure*, essa viene poi riempita da uno o più grafici che si realizzano utilizzando il comando *plot(x,y)*, dove *x* e *y* sono vettori della stessa dimensione. Perciò per ciascun grafico consideriamo, nel caso dell'evoluzione temporale:

- variabile dipendente: vettore degli anni trascorsi dall'inizio dell'inondazione, ossia: $n \text{ anni} - n \text{ anni}(\text{posizione}(\text{id_piena}))$;
- variabili indipendenti: selezioniamo di volta in volta ciascuna piena e cioè, una per volta, tutte le righe della matrice delle τ . Eseguendo l'operazione per ogni tabella che abbiamo costruito precedentemente, si otterranno ventiquattro finestre totali, all'interno delle quali saranno distinti dei grafici in funzione della distanza di buffer considerata.

Si possono descrivere alcuni comandi base per la simbologia e la visualizzazione dei grafici. Ad esempio, in una riga *plot*, oltre alle variabili da inserire, possono essere specificati i colori e gli stili dei grafici, ad esempio l'espressione 'o-' indica che si vuole raffigurare un grafico punteggiato e con linea congiungente continua. Con *xlabel* e

ylabel si possono definire i titoli degli assi, mentre con *title* quello dell'intero grafico; *xlim* e *ylim* sono invece comandi che consentono di definire, rispettivamente per asse *x* e *y*, gli estremi inferiori e superiori. Il comando *hold on* permette invece di plottare più grafici all'interno della stessa finestra; dopo aver specificato tutti gli elementi da inserirvi con la stringa *drawnow* si può dare l'ordine di visualizzare a schermo il risultato (Scuderi, 2005).

A questo punto si passa all'elaborazione dei grafici al variare dello spazio. Questa volta come variabili indipendenti non avremo più gli anni trascorsi dall'avvento della piena ma le distanze di buffer coinvolte in ogni dato di tau statistic. Le variabili dipendenti invece restano invariate. Nella finestra figureranno varie linee spezzate: ognuna corrisponde all'andamento delle tau statistic per uno degli anni seguenti alla piena. Di seguito si inserisce l'intero codice Matlab utilizzato per il caso di studio "India".

```
clear all
close all
clc
%SCRIPT INDIA

%lettura tabella popolazione totale India
TOT_LUCI=xlsread(['C:\Users\39347\Desktop\TESI
MAGISTRALE\INDIA\DATI_INDIA_MATLAB\Tabella_India_Tot_Luci.xlsx'],'A1
:V2');
n_anni=TOT_LUCI(1,:);
%tabella anni di riferimento delle piene
PIENE_ANNI=xlsread(['C:\Users\39347\Desktop\TESI
MAGISTRALE\INDIA\DATI_INDIA_MATLAB\Tabella_India_anno.xlsx'],
'A2:B25');
n_piene=PIENE_ANNI(:,1);
anni_piene=PIENE_ANNI(:,2)';

%lettura tabelle buffer
buffer_list=5:5:100;
BUFFER_ALL=zeros(length(n_piene),length(n_anni),length(buffer_list));
for id_buffer=1:length(buffer_list)
    buffer=buffer_list(id_buffer)
    BUFFER_ALL(:, :, id_buffer)=xlsread(['C:\Users\39347\Desktop\TESI
MAGISTRALE\INDIA\DATI_INDIA_MATLAB\Tabella_India_Buffer_', num2str(bu
ffer), 'km.xlsx'], 'B2:W25');
end

Area_Buffer=xlsread('C:\Users\39347\Desktop\TESI
MAGISTRALE\INDIA\DATI_INDIA_MATLAB\Tabella_India_Area_Buffer.xlsx');
Area_Tot_India=3453688.923;
```

```

%NTL medi areali (simile a densità di popolazione, ossia SOMMA
LUCI/AREA)
%buffer
NTL_medi_BUFFER_ALL=zeros(size(BUFFER_ALL));
for id_piena=1:length(n_piene)
    for id_buffer=1:length(buffer_list)

NTL_medi_BUFFER_ALL(id_piena,:,id_buffer)=BUFFER_ALL(id_piena,:,id_b
uffer)./Aree_Buffer(id_piena,id_buffer);
        end
    end
end
%India
NTL_medi_INDIA=TOT_LUCI(2,:)./Area_Tot_India;

%plot evoluzione temporale valori areali medi di NTL
nn=3;
col=colorcube(nn*(length(buffer_list)+1));
scrsz=get(0,'Screensize');

posizione=zeros(size(anni_piene));
for id_piena=1:length(n_piene)
    posizione(id_piena)=find(anni_piene(id_piena)==n_anni); %trovo
posizione anno di avvento piena
    figure('OuterPosition',scrsz)
    %buffer
    for id_buffer=1:length(buffer_list)
        plot(n_anni,NTL_medi_BUFFER_ALL(id_piena,:,id_buffer),'o-
','Color',col(nn*id_buffer,:), 'DisplayName', ['Buffer
',num2str(buffer_list(id_buffer)), ' km'])
        hold on
    end
end
%India
plot(n_anni(posizione(id_piena)),NTL_medi_BUFFER_ALL(id_piena,posizi
one(id_piena),id_buffer),'o','Color',col(nn*id_buffer,:), 'MarkerFace
Color',col(nn*id_buffer,:))
    end
%India
plot(n_anni,NTL_medi_INDIA,'o-
k','LineWidth',1,'DisplayName','India')
    hold on

plot(n_anni(posizione(id_piena)),NTL_medi_INDIA(1,posizione(id_piena
)), 'ok', 'MarkerFaceColor','k')
    xlim([1989 2013])
    title(['India'; ['Evoluzione temporale dei valori medi areali di
nightlights per ID piena=', num2str(n_piene(id_piene)), ' avvenuta
nell''anno ', num2str(anni_piene(id_piene))]])
    legend show
    legend('Location','West')
    ylabel('Valori medi areali di nightlights [DN/km^2]')
    xlabel('Anno')
    drawnow
    pause

end

%calcolo tau-statistic
tau_INDIA=NaN*ones(size(NTL_medi_BUFFER_ALL));
for id_piena=1:length(n_piene)

```

```

t0=posizione(id_piena)
for id_buffer=1:length(buffer_list)
    for delta_t=t0+1:length(n_anni)

tau_INDIA(id_piena,delta_t,id_buffer)=(NTL_medi_BUFFER_ALL(id_piena,
delta_t,id_buffer)-
NTL_medi_BUFFER_ALL(id_piena,t0,id_buffer))/(NTL_medi_INDIA(1,delta_
t)-NTL_medi_INDIA(1,t0));
        end
    end
end

%plot tau-statistic: evoluzione temporale per ogni buffer
for id_piena=1:length(n_piene)
    figure('OuterPosition',scrsz)
    for id_buffer=1:length(buffer_list)
        plot(n_anni-
n_anni(posizione(id_piena)),tau_INDIA(id_piena,:,id_buffer),'o-
','Color',col(nn*id_buffer,:), 'DisplayName', ['Buffer
',num2str(buffer_list(id_buffer)), ' km'])
        hold on
        xlim([1 length(n_anni)-posizione(id_piena)+4])
        title({'India'; ['Evoluzione temporale della tau-statistic
per ID piena=', num2str(n_piene(id_piena)), ' nell''anno
', num2str(anni_piene(id_piena))]})
        legend show
        legend('Location', 'East')
        xlabel('Numero di anni dall''evento di piena')
        ylabel('tau statistic')
        drawnow
        pause
    end
end

end

%plot tau-statistic: evoluzione spaziale dopo delta_t anni
for id_piena=6:length(n_piene)
    figure('OuterPosition',scrsz)
    for delta_t=1:length(n_anni)
        if posizione(id_piena)+delta_t<=length(n_anni)
            app=tau_INDIA(id_piena,posizione(id_piena)+delta_t,:);
            plot(buffer_list,app(:), 'o-
','Color',col(nn*delta_t,:), 'DisplayName', ['\Delta
t=', num2str(delta_t), ' anni'])
            hold on
            xlim([0 120])
            title({'India'; ['Evoluzione spaziale della tau-statistic
per ID piena=', num2str(n_piene(id_piena))]})
            legend show
            legend('Location', 'East')
            xlabel('Distanza dal centroide dell''area allagata
[km]')
            ylabel('tau statistic')
            drawnow
        end
    end
end
end

```

6.2 Studio del segno della funzione tau-statistic

La tau-statistic è una funzione statistica costituita da un rapporto fra due quantità:

- Numeratore: è la differenza tra le densità di luminosità notturna relativa all'anno in esame e ad una precisa distanza dal centroide dell'area alluvionale, ed i dati di densità di luminosità relativi all'anno in cui è avvenuto l'evento alluvionale alla medesima distanza.
- Denominatore: è la differenza tra i dati di densità di luminosità notturna registrati in tutto il Paese per l'anno in esame, ed i dati di luminosità calcolati in tutto il Paese nell'anno in cui si verifica l'inondazione.

Quando una tra queste differenze è negativa, i valori di tau risulteranno negativi, viceversa quando entrambe le differenze sono positive o negative, i valori di tau saranno positivi. In altre parole, valori positivi di tau-statistic indicano che, rispetto all'anno in cui si è tenuto l'evento alluvionale, la densità di luminosità notturna sia aumentata sia nel buffer di riferimento che in tutta la penisola indiana, o in alternativa diminuita in entrambe le zone. Qualora nell'area di buffer considerata si verificano invece andamenti discordanti rispetto a quelli relativi all'intero paese, si presenterebbero valori di tau negativi. In questo caso può essere interessante osservare il grafico delle densità di luminosità al trascorrere degli anni, in modo tale da intercettare quale sia la causa di valori di tau negativi. Nei grafici di cui sopra, figurano sia gli andamenti di densità di luminosità notturna per ciascun buffer al trascorrere degli anni, simboleggiati da spezzate colorate, che gli andamenti delle densità totali registrati nell'intera nazione, simboleggiati in questo caso da linee di colore nero. Per l'interpretazione degli eventi alluvionali specifici si rimanda al capitolo 4.

Bibliografia

- Adminstat Regno Unito. (2017). *Ugeo urbistat*. Tratto da <https://ugeo.urbistat.com/AdminStat/it/uk/demografia/popolazione/regno-unito/826/1>
- Agenzia Nova. (2019). *India: Bihar, numero morti per alluvioni sale a 123*. Tratto da Agenzia Nova: <https://www.agenzianova.com/a/0/2549709/2019-07-26/india-bihar-numero-morti-per-alluvioni-sale-a-123-2>
- Amravati. (2019). *India Today*. Tratto da Andhra Pradesh: More than 70,000 people rescued as Godavari continues to flood: <https://www.indiatoday.in/india/story/andhra-pradesh-more-than-70-000-people-rescued-as-godavari-continues-to-flood-1577164-2019-08-04>
- Azman, A. S., Luquero, F. J., Salje, H., Henrik, Luquero, & Azman. (2018). Micro-Hotspots of Risk in Urban. *The Journal of Infectious Diseases*.
- Barrientos, M., & Soria, C. (2018). *Demographics: population density*. Tratto da Index Mundi: <https://www.indexmundi.com/map/?t=0&v=21000&r=xx&l=en>
- BBC. (2005). *Flood cuts power to 2,500 homes*. Tratto da http://news.bbc.co.uk/2/hi/uk_news/england/north_yorkshire/4111028.stm
- Beura, D. (2018). Floods in Mahanadi river. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 51-55.
- Brancucci, P. G. (2016). Dispense per l'uso del software QGIS. In *Geomorfologia applicata*. Genova.
- Carlowicz, M. (2012). *Out of the blue and into the black*. Tratto da NASA, Earth Observatory: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/IntotheBlack>
- Centre for Research and Epidemiology of Disaster. (2018). *Economic losses, poverty and disasters*. Tratto da https://www.unisdr.org/2016/iddr/CRED_Economic%20Losses_10oct_final.pdf
- Ceola, S., & Montanari, A. (2014). *Satellite nighttime lights reveal increasing human exposure to floods*. Tratto da <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2014GL061859>
- Coleman, J. M., & Huh, O. K. (2002). *Major world deltas*. Baton Rouge, LA.
- Commissione Europea. (2019). *Le conseguenze dei cambiamenti climatici*. Tratto da https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_it
- Earth Observation Group; NOAA. (2016). *England's light pollution and dark skies*. Landuse.CO.

- Edenhofer, Pichs-Madruga, Sokona, Agrawala, Branco, & Broome. (2014). *Summary for policymakers - Mitigation of climate change*. Tratto da https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_summary-for-policymakers.pdf
- Environment Agency. (2014). *Flooding and mental health: Essential information for*. Tratto da https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/348903/Flooding_and_mental_health_essential_information_for_frontline_responders.pdf
- European Environment Agency. (2019). *Cambiamenti climatici e acqua — Oceani più caldi, inondazioni e siccità*. Tratto da Cambiamenti climatici e acqua.
- G.R.Brakenridge. (2019). "*Global Active Archive of Large Flood Events*". Tratto da Dartmouth Flood Observatory, University of Colorado: <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>.
- Gandhi, J. (2017). *Sharp spike in natural disasters*. Tratto da hindustantimes: <https://www.hindustantimes.com/india->
- GIS. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Geographic_information_system
- Gubbiotti, M., & Finelli, T. (2012). *Profughi ambientali: cambiamento climatico e migrazione forzata*. Legambiente Onlus - Dipartimento Internazionale.
- Gypsy Race. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Gypsy_Race
- Hall, J., Dawson, R. J., Speight, L., Speight, L., Leandro, J., Djordjević, S., & Savic, D. (2008). Attribution of flood risk in urban areas. *Journal of Hydroinformatics*. Tratto da Journal of : <https://iwaponline.com/jh/article/10/4/275/3009/Attribution-of-flood-risk-in-urban-areas>
- Inftub. (s.d.). *L'India, territorio e idrografia*. Tratto da <http://www.inftub.com/geografia/L-India-II-territorio-e-lidro81345.php>
- Insurance Choice UK. (2019). Tratto da How many homes are at risk of flooding in the UK?: <https://www.insurancechoice.co.uk/blog/2019/09/how-many-homes-are-at-risk-of-flooding-in-the-uk>
- Kayastha, S. L., & Yadava, R. (1985). Flood Induced Population Migration in India: A Case Study of Ghaghara Zone. In *GeoJournal Library book series (GEJL, volume 3)* (p. 79-80).
- Koshi (fiume). (s.d.). Tratto da Wikipedia: [https://it.wikipedia.org/wiki/Koshi_\(fiume\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Koshi_(fiume))
- Kottasova, I. (2019). *North England hit by torrential flooding*. Tratto da CNN: <https://edition.cnn.com/2019/11/07/uk/sheffield-uk-flooding-intl-gbr/index.html>
- Lessler, J., Salje, H., Grabowski, M. K. & Cummings, D. A. (2016). Measuring Spatial Dependence for Infectious. *PLoS ONE*.

- Manietti. (2015, Agosto 16). Il paese più popoloso del mondo. *Il Post*.
- Mard, J., Di Baldassarre, G. & Mazzoleni. (2018). Nighttime light data reveal how flood protection. *Science Advances*.
- Matlab*. (s.d.). Tratto da Wikipedia: <https://it.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- Mussi, G. (2018). *GIS: cos'è e a cosa serve*. Tratto da Portale per l'edilizia e architettura: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/gis-cose-e-a-cosa-serve/>
- National Disaster Management Authority Government of India. (2008). *Disaster management guidelines*. Magnum Books Pvt Ltd.
- Nazioni Unite, Dipartimento per gli affari economici e sociali. (2015). *Population.city*. Tratto da World Population Prospects: The 2015 Revision: <http://popolazione.population.city/regno-unito/>
- Northamptonshire County Council. (s.d.). *Northamptonshireheritage*. Tratto da <https://www.northamptonshireheritage.co.uk/learn/historical-events-and-movements/Pages/the-easter-floods.aspx>
- Odisha Cyclone 1999*. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/1999_Odisha_cyclone
- Pelino, V. (2011). L'acqua e la dinamica del cambiamento climatico: inondazioni e siccità.
- Pisani, E. (2017). *Lenius*. Tratto da Cos'è l'indice di sviluppo umano?: <https://www.lenius.it/cose-lindice-di-sviluppo-umano/>
- Prydz, E. B., & Wadhwa, D. (2019). *Classifying countries by income*. Tratto da The World Bank: <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/stories/the-classification-of-countries-by-income.html>
- Rai, D. (2019). *Droughts to flash floods: can India weather the climate crisis?* Tratto da Indiatoday: <https://www.indiatoday.in/diu/story/droughts-to-flash-floods-can-india-weather-the-climate-crisis-1580182-2019-08-12>
- Redazione "notizie.it". (2018). *Cosa sono le piogge monsoniche?* Tratto da notizie.it: <https://www.notizie.it/cosa-sono-le-piogge-monsoniche/>
- River Tame*. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/River_Tame,_West_Midlands
- Royal Geographic Society. (2011). *Flood risk in the UK*. Tratto da 21st century challenges: <https://21stcenturychallenges.org/flood-risk-in-the-uk/>
- Samoa Americane*. (s.d.). Tratto da Wikipedia: https://it.wikipedia.org/wiki/Samoa_Americane
- Scuderì, L. (2005). *Manualetto di Matlab*. Politecnico di Torino. Tratto da http://calvino.polito.it/~falletta/Calcolo_Numerico/ManualettoMatlab.pdf
- Shepherd, A., Mitchell, T., Lewis, K., Lenhardt, A., Jones, L., Scott, L., & Muir-Wood, R. (2013). The Geography of poverty, disasters and climate extremes in 2030.

Subrahmanyam, V. (1988). *Hazards of floods and droughts in India*.

The Royal Commission on Environmental Pollution. (2009). *Artificial Light in the Environment*. London: The Stationery Office.

Treccani. (s.d.). *Regno Unito*. (Treccani) Tratto da <http://www.treccani.it/enciclopedia/gran-bretagna-e-irlanda-del-nord-regno-unito-di/#3idrografia-1>

Van Alphen, J., Bourger, L., Elliot, C., Tachi, K., Fujita, K., & Riedstra, D. (2011). *Flood risk management approaches*.

(Wikipedia). Tratto da Clima dell'India:

https://it.wikipedia.org/wiki/Clima_dell%27India#Monsone

Winterman, D. (2012). Light Pollution, is there a solution? *BBC News Magazine*.