

MPRA

Munich Personal RePEc

Archive

Il valore della protezione di Venezia dal fenomeno dell'acqua alta in diverse condizioni di innalzamento locale del livello del mare

Massimiliano Caporin e Fulvio Fontini

19 febbraio 2014

Online all'indirizzo: <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/53779/>

Relazione MPRA n. 53779, pubblicata il 19 febbraio 2014 14:00 GMT

Il valore della protezione di Venezia dal fenomeno dell'acqua alta in diverse condizioni di innalzamento locale del livello del mare

Massimiliano Caporin*

Fulvio Fontini*[†]

Febbraio 2014

Sommario

Venezia è costruita su diverse isole all'interno della sua laguna ed è soggetta, periodicamente, ad allagamenti causati dal cosiddetto fenomeno dell'Acqua Alta (AA). È attualmente in corso la costruzione di un sistema di dighe mobili, denominato Mo.S.E., per la salvaguardia della città. Il sistema prevede l'innalzamento, quando è necessario, di paratoie mobili che separano temporaneamente la laguna dal mare Adriatico. L'AA, la cui frequenza e il cui livello sono aumentati in maniera esponenziale negli ultimi anni, è un fenomeno occasionale correlato con l'innalzamento locale del livello del mare (ILML) che, in alcuni casi, si ritiene possa essere la conseguenza di vari scenari legati al surriscaldamento globale. Abbiamo condotto un'indagine sui costi-benefici del Mo.S.E., sulla base di diversi scenari di ILML. Innanzitutto, abbiamo simulato possibili scenari futuri di AA nei prossimi 50 anni in base a situazioni diverse di ILML. Dopodiché, abbiamo calcolato i benefici del Mo.S.E., convertendo ciascun episodio evitato di AA in una stima economica (costo evitato). Abbiamo così dimostrato che i benefici sono quasi pari ai costi, se si presuppone un ILML basso, mentre aumentano con l'incremento dell'ILML, a condizione che il mare non raggiunga un livello estremo e catastrofico (tuttora non prevedibile).

Codice di Classificazione J.E.L.: Q54, D61, C22, C53.

* Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali, Università di Padova, Italia.

[†] Autore Corrispondente. Indirizzo di corrispondenza: Fulvio Fontini, DSEA, Università di Padova. Via del Santo 33, I-35123, Padova, Italia. E-mail: fulvio.fontini@unipd.it.

1 Introduzione

La città di Venezia è famosa in tutto il mondo. È costruita su diverse isole situate all'interno di una laguna e presenta caratteristiche storiche e ambientali uniche, tali da giustificare l'inserimento nella Lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO. A causa della sua peculiare posizione geografica è soggetta, periodicamente, a fenomeni di allagamento noti come Acqua Alta (AA), che rappresentano una minaccia per la città ed interferiscono con la vita di tutti i giorni dei suoi abitanti. È attualmente in corso la costruzione di un sistema di dighe mobili denominato Mo.S.E. (acronimo di *Experimental Electromechanical Module*, in italiano "Modulo Sperimentale Elettromeccanico"). Si tratta di un sistema innovativo costituito da schiere di paratoie mobili poste alle bocche di porto della laguna. Quando è necessario, le paratoie mobili vengono alzate per separare la laguna dal mare Adriatico e mantenere il livello di sicurezza dell'acqua al suo interno.

Il sistema Mo.S.E. è stato progettato per salvaguardare Venezia dall'Acqua Alta come soluzione a lunghissimo termine. In questo lasso di tempo, dovrà affrontare le conseguenze del surriscaldamento globale indotte sulla laguna di Venezia e il fenomeno dell'AA. L'ILML riveste, tra l'altro, un ruolo importante per l'AA. Dai dati in nostro possesso si evince¹ che negli ultimi decenni sia il livello che la frequenza degli episodi di AA sono aumentati. L'aumento della frequenza degli episodi equivale, in media, a 0,7 episodi l'anno; l'altezza dei massimi annuali è aumentata di 2,6 mm/anno⁻¹. A ciò si aggiunge un valore stimato di ILML di 2,5 mm/anno⁻¹ [a titolo di riferimento, confrontare questo dato con l'ILM Globale stimato (valutato attorno al 90-100%) da IPCC (2013) di 3,2 mm/anno⁻¹]. Maggiore è l'ILML, e maggiori e più frequenti sono gli allagamenti, tanto maggiori sono i benefici ottenuti dalla salvaguardia di Venezia (aumentano, tuttavia, anche le interferenze con le attività portuali). I benefici del Mo.S.E. possono essere contrapposti ai costi sostenuti per la sua realizzazione, poiché si tratta di un progetto finanziario di grande portata. Il budget iniziale (1,6 miliardi di Euro) è aumentato notevolmente, infatti l'ultima valutazione è stata stimata in (circa) 5,4 miliardi di Euro. Lo scopo del nostro lavoro è quello di valutare i benefici del Mo.S.E. al netto dei costi di realizzazione e dei costi (stimati) di esercizio e gestione annui. Per riuscire in questo intento, abbiamo innanzitutto simulato uno schema di AA nei prossimi 50 anni, replicando la tendenza cronologica osservata e simulando futuri episodi di AA sulla base di diversi scenari possibili di ILML. Abbiamo limitato l'analisi a 50 anni poiché la valutazione economica si basa sulle attuali tecnologie e conoscenze, ovvero non prende in considerazione il progresso tecnologico (ad esempio la ristrutturazione del patrimonio immobiliare o del settore dei trasporti), che può modificare sostanzialmente la definizione di funzione di danno. Dopodiché, abbiamo convertito i dati risultanti in valore economico misurando il valore del danno evitato a Venezia. Infine, abbiamo confrontato il tutto con i costi di investimento riferiti e determinato il costo-beneficio del Mo.S.E. La relazione è strutturata come segue. La sezione 2 descrive la marea e l'AA e illustra la metodologia adottata per le simulazioni. La sezione 3 descrive il rapporto tra AA, ILML e il danno arrecato a Venezia. I risultati della valutazione dei benefici del Mo.S.E. sono riportati nella sezione 4. Seguono le conclusioni e la bibliografia.

¹ I risultati si basano su regressioni lineari semplici della tendenza cronologica dei dati orari o massime giornaliere, dal 1975 al 2009.

2 Simulazione dell'AA e della marea

L'AA dipende dal livello della marea nella laguna di Venezia, che è un fenomeno parzialmente casuale. Può essere definita come una marea oltre una certa soglia, convenzionalmente fissata a +80 cm sopra lo zero mareografico di Punta della Salute, ovvero il livello a cui fa riferimento il Centro Maree – l'ente pubblico incarico del monitoraggio dell'AA – e superato il quale la città inizia ad essere allagata. Le maree sono causate dall'interazione di due componenti: la marea astronomica e lo “*storm surge*”, ovvero l'aumento meteomarinico del livello del mare durante una mareggiata, lett. “sovralzo di tempesta” (Canestrelli et al., 2001). La prima dipende dall'effetto sull'innalzamento del livello del mare di una serie ben nota di parametri deterministici, tra cui i più rilevanti sono l'influenza della luna e l'alternarsi delle stagioni. La marea astronomica ha una forma sinusoidale che può essere calcolata con un grado di precisione molto alto. Tuttavia, essa non spiega completamente il modello di livello del mare osservato nella laguna. Infatti, è possibile individuare (almeno) altri tre elementi principali della climatologia dell'Adriatico Superiore che influenzano il comportamento delle maree: il vento, la pressione barotropica e le “*sesse*” (le oscillazioni all'interno di un bacino quasi chiuso, quale è il Mare Adriatico, dopo una perturbazione). Tutte insieme, queste tre componenti definiscono lo “*storm surge*”. L'interazione dello *storm surge* con la marea astronomica determina l'altezza del livello del mare nella laguna di Venezia. A causa della sua natura, lo *storm surge* è un fenomeno casuale. I dati storici riportano che nel corso degli anni ha avuto una media pari quasi a zero. Pertanto, la marea è una variabile casuale data dalla somma di una componente deterministica e da una componente stocastica. Ne risulta che è possibile stabilire il comportamento casuale della marea attraverso l'osservazione del modello stocastico dello *storm surge*. Entro un determinato giorno, l'AA, se presente, viene associata ad un livello massimo di marea giornaliero oltre la soglia. Chiaramente, la durata dell'AA può variare da un giorno all'altro, ma questo aspetto non influenza l'impatto dell'AA sulle attività economiche, poiché l'elemento discriminante è rappresentato dalla comparsa del fenomeno (e non dalla sua durata). Nel complesso, basandoci sui dati orari del Centro Maree dal 1941 al 2009, abbiamo misurato la durata media dell'AA e abbiamo rilevato che la durata media degli eventi è di circa tre ore, con una durata della maggior parte degli episodi compresa tra una e sei ore.² Inoltre, l'AA si è verificata (in quasi tutti i casi) una volta al giorno (nonostante il fatto che la marea astronomica abbia due massimi nelle 24 ore, di cui uno è generalmente molto più basso rispetto all'altro). Di conseguenza, e visto lo scopo di questa relazione, ci siamo concentrati sulle massime giornaliere, e abbiamo valutato il sistema Mo.S.E. in base alla serie storica giornaliera del valore massimo del livello del mare nella laguna di Venezia.

Per interpretazione, anche la sequenza delle massime giornaliere è data dalla somma di due

² L'analisi descrittiva della durata degli episodi di AA è disponibile su richiesta.

componenti: una è la marea astronomica, e la seconda è correlata allo *storm surge*. Per poter valutare le prestazioni del sistema Mo.S.E., abbiamo dovuto simulare l'evoluzione delle massime giornaliere. A tal fine, abbiamo innanzitutto specificato un modello per le serie temporali delle massime giornaliere. Quindi, abbiamo applicato il modello ai dati rilevati dal gennaio 1975 al dicembre 2009, per un totale di 12.784 giorni (misura campione T). Il periodo compreso tra il 1941 ed il 1974 è stato escluso poiché mancano i dati di oltre 280 giorni. Abbiamo preferito focalizzarci su una serie di anni completi piuttosto che sostituire i dati mancanti con valori indicativi. Il nostro scopo è quello di fare previsioni (o simulazioni) a lungo termine delle massime giornaliere. Di conseguenza, abbiamo scelto di focalizzarci su un approccio puramente statistico piuttosto che astronomico e meteorologico, in cui vengono esplicitamente prese in esame le varie componenti che influenzano il livello della marea.

Il modello considerato ipotizza che la serie temporale delle massime giornaliere è data dalla somma di due componenti, imitando la presenza di due elementi che influenzano il livello della marea. Se definiamo la sequenza delle massime giornaliere con m_t , la serie viene scomposta come segue:

$$m_t = \alpha_t + \sigma_t s_t, \quad (1)$$

dove α_t è una componente deterministica che cattura l'impatto medio del livello della marea astronomica sulle massime giornaliere; σ_t è una componente deterministica che utilizza l'effetto della marea astronomica nella dispersione delle massime giornaliere; infine, s_t è la componente stocastica che possiamo associare allo *storm surge*. Le due componenti deterministiche, α_t e σ_t , hanno una struttura simile, e sono date dall'unione di una componente lineare ed una serie di componenti armoniche. Il primo simbolo, α_t è uguale a:

$$\alpha_t = \beta_0 + \beta_1 t + \sum_{j=1}^Q \left(\delta_j \cos\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) + \gamma_j \sin\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) \right), \quad (2)$$

dove t denota una tendenza lineare, Q è il numero delle armoniche considerate, ω_j , $j = 1, 2, \dots, Q$ indicano la frequenza delle armoniche, e β_0 , β_1 , δ_j e γ_j , $j = 1, 2, \dots, Q$ sono i parametri da stimare. Facciamo notare che l'innalzamento del livello del mare è associato al valore del parametro β_1 . Le frequenze armoniche sono espresse in giorni e possono essere facilmente calibrate osservando il periodogramma delle massime giornaliere. Infatti, un approccio simile è stato utilizzato per altri studi, ad esempio per l'analisi delle serie storiche del vento e delle temperature (Caporin e Pres, 2012, 2013) e nella letteratura finanziaria (Andersen e Bollerslev, 1997).

Da notare che le frequenze sono associate principalmente ad ampiezze interpretabili di oscillazioni delle massime giornaliere, quali le componenti annuali e semestrali e le componenti lunari mensili e quindicinali.³ Per contro, la dinamica deterministica di σ_t viene specificata effettuando una trasformazione logaritmica

³ Il secondo può essere associato alla durata anomala dei mesi lunari sinodici e siderali.

$$\ln(\sigma_t^2) = \phi_0 + \sum_{j=1}^P \left(\rho_j \cos\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) + \theta_j \sin\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) \right), \quad (3)$$

dove il numero delle armoniche e la loro frequenza può differire da quelle dell'equazione (2), e i parametri da stimare sono Φ_0 , ρ_j e θ_j , $j = 1, 2, \dots, P$. Infine, la componente stocastica, lo *storm surge*, viene modellata come un modello ARMA-EGARCH :

$$A(L) s_t = B(L) \eta_t, \quad (4)$$

$$\eta_t = h_t^{0.5} z_t, \quad (5)$$

$$\ln(h_t) = \varphi_0 + \varphi_1 \ln(h_{t-1}) + \varphi_2 |z_{t-1}| + \varphi_3 z_{t-1}, \quad (6)$$

dove L è un *lag operator*, $A(L) = \sum_{j=1}^p a_j L^j$ and $B(L) = \sum_{j=1}^q b_j L^j$ sono i polinomi AR e MA, h_t è la varianza condizionale, z_t è l'innovazione standardizzata, ed i parametri da stimare sono α_j ,

$$j = 1, 2, \dots, p, b_j, j = 1, 2, \dots, q, \varphi_0, \varphi_1, \varphi_2 \text{ and } \varphi_3.^4$$

I parametri del modello sono stati stimati seguendo un approccio multifase. Innanzitutto, abbiamo stimato i parametri in α_t con un modello di regressione lineare semplice (con errori standard importanti dovuti alla presenza di eteroschidasticità delle innovazioni) nella seguente equazione:

$$m_t = \beta_0 + \beta_1 t + \sum_{j=1}^Q \left(\delta_j \cos\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) + \gamma_j \sin\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) \right) + \varepsilon_t. \quad (7)$$

Poi, abbiamo stimato di nuovo i parametri in σ_t con il metodo dei minimi quadrati sui residui della trasformata logaritmica dell'equazione precedente. Infatti, $\hat{\varepsilon}_t = m_t - \hat{a}_t$ and $\ln(\hat{\varepsilon}_t^2) = \ln(\sigma_t^2) + \ln(s_t^2)$ quindi:

$$\ln(\hat{\varepsilon}_t^2) = \phi_0 + \sum_{j=1}^P \left(\rho_j \cos\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) + \theta_j \sin\left(\frac{2\pi t}{\omega_j}\right) \right) + \zeta_t. \quad (8)$$

Infine, lo s_t stimato è risultato $\hat{s}_t = \hat{\varepsilon}_t \exp(-0.5\hat{\sigma}_t^2)$,^t e i parametri ARMA-EGARCH sono stati recuperati con i metodi della massima verosimiglianza. L'uso degli approcci di stima multifase è computazionalmente conveniente, anche se implica chiaramente una perdita di efficienza. Visti i parametri stimati, il modello può essere facilmente usato per generare simulazioni a lungo termine dell'evoluzione

⁴ Abbiamo preferito il modello EGARCH di Nelson (1991) ad altre specifiche GARCH vista l'assenza di restrizioni sui parametri che garantiscono la positività della varianza e la simultanea presenza di asimmetria della volatilità.

delle serie temporali delle massime giornaliere. Le procedure di simulazione adottate sono descritte nei seguenti step:

- i Fissare la durata della simulazione M e, se necessario, calibrare la tendenza media, parametro β_1 ;
- ii Generare le innovazioni per il modello ARMA-EGARCH, ovvero la sequenza dei valori per ζ_{T+i} , $i = 1, 2, \dots, M$ nell'equazione 6; le innovazioni possono essere generate campionando da una data densità o , in alternativa, ricampionando i residui del modello; noi abbiamo adottato il secondo approccio per evitare un'ipotesi distribuzionale;
- iii Simulare la sequenza ARMA-EGARCH s_{T+i} , $i = 1, 2, \dots, M$;
- iv Sommare le componenti deterministiche all'evoluzione stocastica simulata, ottenendo m_{T+i} , $i = 1, 2, \dots, M$;
- v Per generare diverse possibili evoluzioni future W delle massime giornaliere, ripetere gli step da ii a iv.

La calibrazione del parametro della tendenza media nello step i permette di sostituire il valore stimato di ILML con dati alternativi. Tale sostituzione è cruciale per determinare l'evoluzione degli eventi di AA in diverse condizioni di ILML. Di seguito, utilizzeremo diversi valori per β_1 , ciascuno associato ad una specifica ipotesi ILML.

3 Il fenomeno dell'Acqua Alta e i danni per Venezia

I livelli e le frequenze dei possibili episodi futuri di AA sono stati convertiti in valori economici attraverso la misurazione dei danni arrecati al Comune di Venezia dal fenomeno dell'AA. Ci siamo attenuti alla metodologia suggerita da Fontini et al. (2010), che ha considerato due componenti per quanto riguarda la funzione di danno. La prima dipende dalla ristrutturazione dei complessi residenziali danneggiati dagli allagamenti. Il fenomeno dell'AA non si è mai verificato nei mesi di luglio e agosto.⁵ Pertanto, è stato preso in esame un intero anno solare, a partire dal primo di luglio fino al 30 di giugno dell'anno successivo. Durante questo periodo, si è ipotizzato che i lavori di ristrutturazione e di restauro abbiano avuto luogo una sola volta (nel periodo dell'anno senza AA) sulla base dell'episodio di maggiore rilevanza osservato nell'arco di tempo considerato. L'altezza della marea determina la superficie totale della città colpita dall'AA, e quindi il numero di edifici coinvolti che richiedono lavori di ripristino.

Il Comune di Venezia fornisce i dati relativi alle porzioni di città che vengono allagate ogni +10 cm di innalzamento della marea.⁶ Ci siamo attenuti alla cosiddetta altimetria di "Frassetto", che si basa sull'intera superficie allagata del centro storico ad ogni innalzamento di +10 cm dell'AA, e non sulla più recente altimetria di "Insula" (si veda Boato et al. 2009), poiché quest'ultima fa riferimento unicamente alle

⁵ Vedi <http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/1754> [ultimo accesso febbraio 2014].

⁶ Vedi <http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/2973> [ultimo accesso febbraio 2014].

aree pubbliche allagate e non all'intera superficie.⁷ Da un confronto tra le due altimetrie risulta che, in media, il 25% della superficie allagata della città è area pubblica. Si presume quindi che la parte restante sia privata, quindi abbiamo convertito la superficie totale di tale area nella lunghezza dei muri colpiti dall'allagamento usando una conversione (standard) di tipo 1:1. I costi di ristrutturazione (intonacatura) sono stati attribuiti alla lunghezza dei muri colpiti dagli episodi di AA.⁸ Abbiamo preso come base i prezzi costanti del 2013 partendo dal presupposto che il 50% degli edifici è di particolare interesse (storico) e/o necessita di interventi specifici; per questi edifici, i costi dei lavori di ristrutturazione sono stati raddoppiati. La tabella 1 riporta la funzione di distribuzione cumulativa del danno al patrimonio immobiliare. Le cifre sono espresse in milioni di Euro. Facciamo notare che si assume un massimo di marea superiore a +180 cm, poiché questo è il livello oltre il quale (quasi) tutta la città risulta allagata (storicamente, un livello di marea così alto è stato osservato solo una volta, durante la famosa alluvione del 4 novembre 1966).

Vedi Tabella 1: Funzione di distribuzione cumulativa del danno al patrimonio immobiliare dovuto all'AA.

La seconda componente della funzione di danno dipende dalla frequenza degli episodi di AA. Per questa componente sono rilevanti due livelli di AA. Il primo prevede un livello di AA tale da ostacolare le attività giornaliere, in particolare gli spostamenti delle persone più giovani e più anziane, nonché le attività turistiche. Hanno rilevanza per questa componente solo gli episodi di AA con un livello superiore a +120 cm. Noi ci siamo attenuti alla metodologia proposta da Fontini et al. (2010), che ci consente di convertire il numero di attivazioni del Mo.S.E. oltre tale soglia in costi legati alla perdita di turismo e spese per sostituzioni, per l'assistenza diurna⁹ a persone anziane e per servizio babysitter (per bambini in età scolare impossibilitati ad andare a scuola). Il secondo livello rilevante riguarda quello di attivazione del Mo.S.E. da parte del Consorzio Venezia Nuova, l'ente di gestione incaricato della costruzione e del funzionamento del Mo.S.E., che ha fissato un livello di marea pari a oltre +110 cm come valore di riferimento della marea all'interno della laguna dopo l'attivazione del Mo.S.E. Si presume che tale livello riesca a contenere l'altezza dell'acqua all'interno della laguna nonché i danni derivanti dall'AA a causa della sua altezza. D'altro canto, ogni attivazione del Mo.S.E. avrà un impatto sulle attività del porto di Venezia. Infatti, il porto principale di Venezia è collegato al Mare Adriatico¹⁰. Quando le barriere sono chiuse, le navi vengono fatte sostare in un primo momento fuori dalla laguna, e successivamente fatte entrare attraverso una conca di navigazione. Le imbarcazioni già attraccate ai pontili all'interno della laguna devono aspettare che vengano ripristinate le corrette condizioni di navigazione. L'attivazione del Mo.S.E. implica pertanto costosi ritardi per le attività portuali. Chiaramente, maggiore è la frequenza con cui vengono tenute chiuse le barriere, maggiori saranno i costi legati alle interferenze con le attività portuali, ma minore sarà il danno arrecato a Venezia a causa dell'AA. Vergano et al. (2010) ha ipotizzato due possibili scenari legati ai costi

⁷ Da notare, tuttavia, che nell'altimetria di "Frassetto" alcune zone di Venezia, come Giudecca, Murano, Burano, Torcello, Lido e altre isole minori, non sono state prese in esame. Pertanto, non abbiamo considerato queste zone nei nostri calcoli.

⁸ Per i lavori di intonacatura si ipotizza un'altezza fissa di 1 m (con un rapporto del 60% per i muri esterni e del 40% per quelli interni), pari ad un costo di 54 Euro per metro lineare.

⁹ Secondo Cellerino (1998), si ipotizza che il 10% della popolazione tra i 75 e gli 84 anni sia confinata in casa e richieda assistenza diurna durante gli episodi di AA.

¹⁰ Le interferenze con le attività dei piccoli attracchi turistici e altri porti di Chioggia – utilizzati principalmente per le attività di pesca – non sono state prese in esame nel nostro studio a causa della mancanza di dati.

delle interferenze del Mo.S.E. con le attività portuali. Lo scenario a “basso costo” ipotizza un’effettiva attivazione delle paratoie e un flusso costante di imbarcazioni nell’arco di tempo, mentre lo scenario ad “alto costo” si basa sull’ipotesi di un aumento del traffico di navi e non considera la riduzione dei ritardi dovuti all’attivazione delle paratoie. Abbiamo preso la media delle cifre¹¹ di questi scenari come valore dei costi delle interferenze annuali. La serie temporale delle massime giornaliere mostra che durante il periodo considerato dallo studio di Vergano et al. (2010), la media annuale è stata di 6.3 episodi di massima ampiezza di marea superiore o pari a +110 cm. Ciò consente di dedurre un costo medio per interferenze per ogni episodio di chiusura del Mo.S.E. pari a 0,168 milioni di Euro. Infine, nella nostra valutazione, abbiamo preso anche in esame i dati annuali relativi ai costi di gestione e manutenzione (O&M)¹², pari a 13,3 milioni di Euro/anno⁻¹.

Le previsioni di AA dipendono, tra l’altro, dall’ILML. A causa della mancanza di dati, non abbiamo considerato la possibile interazione tra il surriscaldamento globale e le componenti meteorologiche dell’AA (*storm surge*), mentre abbiamo preso in esame i possibili ILML secondo vari scenari, simulandone l’impatto solo attraverso l’incremento (annuo) dell’andamento della marea. Abbiamo considerato cinque possibili scenari in cui l’ILML va dal livello più basso, corrispondente all’andamento storico, a un livello estremamente alto. In particolare, siamo partiti da uno scenario in cui il livello del mare continua a salire fino a raggiungere lo stesso livello dell’andamento storico (stimato sulla base del nostro campione di dati), ovvero 2,5mm/anno⁻¹. Chiaramente, uno scenario di questo tipo escluderebbe l’aumento dell’ILML dovuto al surriscaldamento globale. Esistono in letteratura diversi possibili scenari che prendono in considerazione gli effetti di quest’ultimo. Noi abbiamo considerato altri tre possibili scenari in cui il surriscaldamento globale riveste un ruolo sempre più importante. In particolare, abbiamo considerato innanzitutto uno scenario con un ILML basso, che ipotizza un ILML annuo costante di 3,7mm/anno⁻¹. Tale livello corrisponde al valore di partenza dell’ILM medio globale comune alle quattro proiezioni basate sui processi (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5) prese in esame da IPCC (2013).¹³ In tali proiezioni, il livello aumenta nel tempo; pertanto, presupporre un livello fisso corrisponde all’adozione di un’ipotesi ottimistica riguardo all’ILML. Secondariamente, abbiamo ipotizzato uno scenario “IPCC medio”, in cui è stata fatta una media degli aumenti stimati ottenuti dai quattro scenari IPCC basati sui processi menzionati sopra, supponendo un aumento lineare nell’arco del periodo esaminato. Il dato che ne risulta è pari a 5,6 mm/anno⁻¹. Curiosamente, tale livello coincide con il limite inferiore delle stime dell’ILM globale, come riferito dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (2010). Abbiamo considerato anche uno scenario pessimistico (livello alto) ipotizzando un ILML annuo risultante dallo scenario dell’IPCC che fornisce le proiezioni più elevate dell’ILM medio globale, vale a dire RCP8.5. Questo valore è pari a 7,4 mm/anno⁻¹. Infine, abbiamo considerato lo scenario peggiore che corrisponde alla

¹¹ Le cifre aggiornate sono 653.601 e 1.463.855 Euro, rispettivamente.

¹² Aggiornamento di Fontini et al. (2010).

¹³ Vedi IPCC, 2013, pag. 1180.

previsione massima presente in letteratura¹⁴ basata su modelli semi-empirici (Nicholls et al., 2011), ovvero due metri per l'intero secolo. Tale dato, che coincide anche con il limite massimo della previsione riportata nel rapporto del 2010 del Consiglio Nazionale delle Ricerche, produce un'ILML annuo (costante) di 20 mm/anno⁻¹. Nella tabella 2 sono riportati i dati relativi ai cinque scenari ipotizzati.

Tabella 2. Ipotesi di ILML per ogni scenario.

I cinque scenari ipotizzati prevedono impatti diversi dell'ILML sull'AA. Abbiamo condotto 10.000 simulazioni per ogni scenario. La figura 1 mostra il numero medio di attivazioni del Mo.S.E. previsto annualmente per ogni scenario, che è un dato rilevante per la seconda componente del danno arrecato a Venezia a causa dell'AA. Il riquadro a sinistra (Figura 1a) mostra gli scenari da S1 a S4, mentre lo scenario peggiore, S5, è rappresentato nel riquadro a destra (Figura 1b). La Figura 2 mostra la media prevista di eventi di AA con livello oltre 180 cm in ogni scenario, un dato che influenza la prima componente della funzione di danno.¹⁵

Figura 1: Numero previsto di attivazioni del Mo.S.E. negli scenari S1, S2, S3, S4 (riquadro a sinistra) e S5 (riquadro a destra)

Figura 2: Numero previsto di eventi di AA oltre +180 cm negli scenari S1, S2, S3, S4 e S5.

Facciamo notare che maggiore è il livello previsto per l'ILML, più frequenti sono le attivazioni del Mo.S.E. ogni anno, e più numerosi gli episodi di AA estremamente alta. In particolare, possiamo notare che la frequenza delle attivazioni del Mo.S.E. aumenta in maniera esponenziale negli scenari da S1 a S4; nello scenario S5, la frequenza delle attivazioni è così alta che il Mo.S.E. rimarrà (quasi sempre) chiuso durante l'intero l'anno nell'ultima decade. Ovviamente, tale risultato dipende dal livello estremamente alto dell'ILML ipotizzato nello scenario peggiore. Per quanto riguarda la frequenza del massimo di marea nel periodo esaminato, possiamo notare che, anche nel caso dello scenario più conservativo, S1, sono contemplati due episodi di marea oltre 180 cm nell'arco dei 50 anni. Anche se un tale livello di AA è considerato, in questo momento, un evento estremamente eccezionale, potrebbe essere plausibile dato che è stato osservato una volta negli ultimi 50 anni e che il livello del mare è in costante aumento. Chiaramente, tale frequenza aumenta contestualmente all'aumento dell'ILML, fino a raggiungere un

¹⁴ Non abbiamo considerato un ILM più alto per vari motivi. Innanzitutto, anche se si può ottenere un livello più alto ipotizzando il verificarsi di eventi catastrofici come il crollo della calotta glaciale dell'Antartico, non si trovano consensi in letteratura sulla probabilità di tali eventi. Inoltre, l'innalzamento del livello del mare di diversi metri avrebbe un impatto talmente devastante sia a livello globale che locale che una valutazione precisa dei costi e dei benefici di uno specifico progetto (quale il Mo.S.E.) non avrebbe molto senso. Infine, l'effettiva attivazione del Mo.S.E. non è garantita in caso di ILM estremo. Infatti, il Mo.S.E. è stato progettato per gestire maree fino a tre metri. L'AA più alta osservata finora è stata di 194cm. Pertanto, dal punto di vista teorico, il Mo.S.E. può funzionare con un'ILML fino a (circa) un metro.

¹⁵ Le medie riportate nella Figura 1 sono state calcolate sulla base delle simulazioni per ogni anno. Per contro, le medie riportate nella Figura 2 sono ottenute da simulazioni e anni.

numero esorbitante di 25 episodi di AA con un livello superiore a 180 cm nell'arco di 50 anni. Per quanto notevole, questo numero non è improbabile considerato che, nello scenario S5, è previsto un aumento del livello del mare di un metro alla fine del periodo, che implicherebbe il verificarsi, ogni anno, di vari episodi di AA estremi nell'ultima decade.

4 Valutazione dei benefici del Mo.S.E.

La differenza tra i danni che si verificherebbero senza il Mo.S.E. e quelli che potrebbero verificarsi con l'attivazione del Mo.S.E. fornisce una stima economica dei benefici dell'opera. Per ogni simulazione del livello della marea in un arco di tempo di 50 anni, abbiamo valutato i costi correlati agli episodi di AA, con e senza Mo.S.E. Per ottenere dati monetari comparabili, i costi sono stati scontati al tasso del 2%. La Figura 3 mostra la valutazione dei danni con e senza Mo.S.E. per lo scenario S3 (medio). Il grafico descrive la mediana, il primo e terzo quartile ed il minimo e massimo delle simulazioni per i valori cumulati dei primi 5, 10, 25 e 50 anni, con e senza Mo.S.E. Le linee tratteggiate indicano i costi totali sostenuti per il Mo.S.E. Tutte le cifre sono espresse in miliardi di Euro, ai prezzi costanti del 2013.

Figura 3. Danni arrecati a Venezia nello scenario S3 con e senza Mo.S.E. tra 5, 10, 25 e 50 anni.

Da notare che i danni aumentano col tempo man mano che aumenta l'ILML. L'attivazione del Mo.S.E. riduce la volatilità delle stime, poiché consente di contenere l'altezza dell'AA. Pertanto, la volatilità residua dipende solo dal numero delle attivazioni previste. Vogliamo puntualizzare che, senza Mo.S.E., i danni totali previsti per Venezia sono stimati in 8,27 miliardi di Euro in 50 anni. Con il Mo.S.E. è possibile ridurli a 2,25 miliardi di Euro, determinando quindi un beneficio, ovvero danni evitati, stimato in oltre 6 miliardi di Euro. Tale importo è superiore ai costi riferiti, che ammontano a 5,4 miliardi di Euro. Pertanto, possiamo aspettarci un valore netto positivo per il Mo.S.E nell'arco di 50 anni. Chiaramente, il valore dei benefici dipende dai diversi ILML ipotizzati. La Figura 4 riassume i benefici per Venezia ottenuti grazie al Mo.S.E. negli scenari S1, S2, S3, S4 e S5. Le cifre (valori mediani) sono riportate nella Tabella 3.¹⁶

Figura 4. Benefici del Mo.S.E. per Venezia negli scenari S1, S2, S3, S4 e S5 tra 5, 10, 25 e 50 anni.

Tabella 3. Danni con e senza Mo.S.E. negli scenari S1, S2, S3, S4 e S5, tra 5, 10, 25 e 50 anni.

¹⁶Le statistiche descrittive delle 10.000 simulazioni per ogni scenario possono essere fornite dagli autori su richiesta.

Possiamo notare che i danni aumentano nel tempo come previsto, con e senza Mo.S.E. La sua attivazione consente di ridurre i danni. Di conseguenza, in ogni scenario vengono riscontrati dei benefici grazie all'uso del Mo.S.E. Il valore dei benefici aumenta con l'ILML per gli scenari S1, S2, S3 e S4. La cifra media va da 5,3 miliardi a 6 miliardi. Tenuto conto che i costi riferiti sono pari a 5,4 miliardi di Euro, osserviamo un beneficio netto positivo grazie al Mo.S.E. negli scenari S2, S3 e S4. I benefici aumentano ipotizzando un ILML maggiore in ogni scenario, con cifre leggermente negative per lo scenario di riferimento S1 (senza surriscaldamento globale). Osservando le cifre del primo quartile ed il massimo, notiamo, tuttavia, che in S1 (quasi) metà delle simulazioni riportano un beneficio netto superiore al costo. Pertanto, anche in S1, possiamo stabilire un'analisi costo-beneficio non-negativa per il Mo.S.E. Il dato dello scenario estremo S5 appare, a prima vista, contraddittorio, poiché la media stimata del beneficio ottenuto grazie al Mo.S.E. è inferiore ai valori degli altri scenari. Questo concetto risulta più chiaro osservando i valori dei danni riportati nella Tabella 3. Da notare che il danno senza il Mo.S.E. in S5, anche se superiore a quello riportato in S2 e S3, non è eccessivamente alto ed è persino comparabile al danno di S4 nei primi 25 anni di simulazioni. Tuttavia, il danno con e senza Mo.S.E. esplose nella seconda metà del periodo considerato per lo scenario S5 rispetto al danno riportato per gli altri scenari. Ciò determina valori ridotti dei benefici rispetto agli altri scenari. La spiegazione dipende dalla frequenza delle attivazioni del Mo.S.E. nello scenario S5 rispetto alle attivazioni negli altri scenari (vedansi Figura 1a e Figura 1b), che provocano interferenze continue con le attività del porto. Tuttavia, abbiamo evidenziato che una stima esatta delle conseguenze dell'AA nello scenario S5 non può essere considerata affidabile quanto le stime degli altri scenari, poiché lo scenario S5 assume un ILML ai limiti dei livelli (presumibilmente) compatibili con l'utilizzo del Mo.S.E.¹⁷ (e, d'altro canto, anche la probabilità di un ILM maggiore rispetto a quello riportato nel RCP8.5 – il nostro scenario S4 – non può essere considerata affidabile per una valutazione secondo IPCC, 2013).

5 Conclusioni

In questa relazione abbiamo fatto una stima del valore del sistema Mo.S.E., ovvero il sistema di paratoie mobili progettato per salvaguardare Venezia dal fenomeno periodico dell'AA. Innanzitutto, abbiamo calcolato tale valore ipotizzando la possibile tendenza futura dell'AA in base a diverse possibili condizioni di ILML, dopodiché lo abbiamo confrontato con gli investimenti e i costi di manutenzione e gestione (O&M) riferiti. I nostri calcoli forniscono un limite più basso rispetto al valore stimato per la salvaguardia di Venezia per diversi motivi. Innanzitutto, perché i dati sugli allagamenti e sulle attività economiche, necessari per valutare l'impatto economico delle inondazioni, non includono tutti i sestieri di Venezia e gli altri comuni presenti nella laguna di Venezia (colpiti dal fenomeno dell'AA), ma solo la zona centrale (storica) della città. Inoltre, l'impatto economico non tiene conto di tutti i danni possibili, ad esempio esclude l'impatto dell'AA sui negozi

¹⁷Vedasi nota a piè di pagina n. 6.

e sulle merci conservate nei magazzini, a causa della mancanza di dati. Le simulazioni dell'AA non comprendono l'eventuale interazione tra l'ILML e lo *storm surge*, che potrebbe aumentare la frequenza e l'altezza dell'AA. Infine, non sono stati considerati i costi indiretti (quali esternalità), attitudine al rischio (che influenza i valori opzionali dell'investimento) e le reazioni strategiche all'ILML. Ciò nonostante, abbiamo dimostrato che i benefici stimati, ampiamente maggiori dei costi originali programmati per l'investimento, sono stati fortemente erosi dall'aumento del budget stanziato durante la costruzione dell'opera. Tuttavia, si riscontrano ancora dei benefici netti positivi, il cui valore dipende essenzialmente dall'ILML ipotizzato. In particolare, i benefici sono maggiori dei costi quanto maggiore è l'ILML ipotizzato, a condizione che non sia eccessivo. Se, al contrario, l'ILML fosse limitato o nullo, i benefici derivanti dalla protezione di Venezia dall'AA sarebbero interamente annullati dall'investimento e dai costi di gestione e manutenzione. Allo stesso modo, ove nell'arco di 50 anni si verificasse un catastrofico ILML di un metro, sia l'AA che il Mo.S.E. interferirebbero con le attività giornaliere così frequentemente che i benefici del Mo.S.E. non sarebbero sufficienti a compensare i costi. Il nostro lavoro intende evidenziare l'importanza di una corretta pianificazione del budget per investimenti a così ampio respiro, e mette in evidenza l'impatto economico negativo di un ILML alto e, di conseguenza, l'importanza di un investimento per un adeguamento su larga scala, quale il sistema Mo.S.E., per cercare di ridurre al minimo tale impatto. Esprime anche dei dubbi sul suo valore netto positivo nel caso si verificasse una marea catastrofica (e la probabilità che ciò avvenga, tuttavia, non può essere determinata adesso).

5.1 Riconoscimenti

Vogliamo ringraziare Alberto Tomasin, per averci reso disponibili i dati del Centro Maree, unitamente a Georg Umgieser, per l'aiuto concesso sul fenomeno dell'Acqua Alta. Ovviamente, ci assumiamo la responsabilità del contenuto di questo articolo. F.F. esprime la sua gratitudine per il contributo di ricerca PRIN-MIUR 2010-11 "Cambiamenti climatici nell'area Mediterranea: scenari evolutivi, politiche di mitigazione e innovazione tecnologica".

5.2 Bibliografia

Andersen, T.G., e Bollerslev, T., 1997, Intraday periodicity and volatility persistence in financial markets, *Journal of Empirical Finance* 4, 115-158.

Boato, L., Canestrelli, P., Facchin, L. e Todaro, R. (2009). Venezia altimetria, Comune di Venezia, Istituzione centro previsioni e segnalazioni maree, in collaborazione con Insula spa. Disponibile su: <http://www.comune.venezia.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/1754> [ultimo accesso: febbraio 2014].

Canestrelli, P., Mandich, M., Pirazzoli, P.A. e Tomasin, A. (2001). Wind, Depression and Seiches: Tidal Perturbations in Venice (1951-2000), Centro previsioni e segnalazioni maree, Comune di Venezia. Disponibile su http://93.62.201.235/maree/DOCUMENTI/Venti_depressioni_e_sesse.pdf [ultimo accesso: febbraio 2014].

Caporin, M., e Pres, J., 2012, Modeling and forecasting wind speed intensity for weather risk management, *Computational Statistics & Data Analysis*, 56, 3459-3476.

Caporin, M., e Pres, J., 2013, Forecasting Temperature Indices Density with Time-Varying Long-Memory Models, *Journal of Forecasting*, 32, 339-352.

Cellerino, R. (1998). Venezia Atlantide: l'impatto economico delle acque alte, Franco Angeli, Milano.

Fontini, F., Umgiesser, G. e Vergano, L. (2010). The Role of Ambiguity in the Evaluation of the Net Benefits of the MO.S.E. System in the Venice Lagoon, *Ecological Economics*, 69, 1964-1972.

IPCC, (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Disponibile su <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> [ultimo accesso: febbraio 2014].

IPCC, (2007). Climate Change 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (curatori) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponibile su http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html [ultimo accesso: febbraio 2014].

Vergano, L., Umgiesser, G. e Nunes, P. A.L.D. (2010). An economic assessment of the impacts of the MOSE barriers on Venice port activities, *Transportation Research Part D*, 15, 343-349.

National Research Council, (2010). *Advancing the Science of Climate Change*. Washington, DC: The National Academies Press.

Nelson, D. B. (1991). Conditional heteroskedasticity in asset returns: A new approach. *Econometrica* 59, 347-370

Nicholls, R. J., Marinova, N., Lowe, J. A., Brown, S., Vellinga, P., de Gusmao, D., Hinkel, J. e Tol, R. S. J., (2011). Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4 degrees C world' in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369, 161-181.

Altezza dell' AA	Danni (milioni di euro)
≤80	0
81---90	0,56
91---100	6,97
101---110	23,03
111---120	69,08
121---130	135,01
131---140	177,12
141---150	189,16
151---160	194,94
161---170	195,85
171---180	196,07
>180	196,33

Tabella 1. Funzione di distribuzione cumulativa dei danni al patrimonio causati dall'AA.

scenario	Impatto sull' AA	ILML
S1	storico	2,4 mm anno ⁻¹
S2	basso	3,7 mm anno ⁻¹
S3	medio	5,6 mm anno ⁻¹
S4	alto	7,4 mm anno ⁻¹
S5	caso peggiore	20 mm anno ⁻¹

Tabella 2. Ipotesi di ILML per ogni scenario

Scenario S5

anni	Danni senza Mo.S..E. (A)	Danni con Mo.S..E. (B)	Benefici del Mo.S.E. (A---B)
5	716	205	511
10	1.576	443	1.133
25	4.817	2.154	2.664
50	16.746	12.252	4.494

Scenario S4

anni	Danni senza Mo.S..E. (A)	Danni con Mo.S..E. (B)	Benefici del Mo.S.E. (A---B)
5	649	197	452
10	1.363	396	967
25	3.848	1.043	2.806
50	8.783	2.738	6.046

Scenario S3

anni	Danni senza Mo.S..E. (A)	Danni con Mo.S..E. (B)	Benefici del Mo.S.E. (A---B)
5	640	196	444
10	1.328	393	935
25	3.674	999	2.675
50	8.276	2.255	6.020

Scenario S2

anni	Danni senza Mo.S..E. (A)	Danni con Mo.S..E. (B)	Benefici del Mo.S.E. (A---B)
5	622	195	427
10	1.292	388	904
25	3.475	964	2.512
50	7.640	1.976	5.664

Scenario S1

anni	Danni senza Mo.S..E. (A)	Danni con Mo.S..E. (B)	Benefici del Mo.S.E. (A---B)
5	613	195	419
10	1.269	386	883
25	3.349	946	2.403
50	7.197	1.871	5.326

Gli importi sono espresso in miliardi di Euro

Tabella 3. Danni con e senza Mo.S.E. in ogni scenario tra 5, 10, 25 e 50 anni.









