

Capitolo 9

Cyber catastrophe bond come strumento per il trasferimento del rischio informatico

Loretta Mastroeni, Alessandro Mazzocchi

Abstract

The use of the cloud, and in particular cloud services for storing personal or business data and for running programmes, is becoming increasingly popular, as it is an efficient and cost-effective practice. However, cloud services may not always be available, potentially causing significant losses for both customers and service providers. Typically, in such cases, the provider is obliged to compensate its customers in case of interruptions.

However, in order to protect itself against such losses, the supplier may take out an insurance contract, transferring the risk to the insurer and paying an insurance premium. It should be noted that in situations where the cloud service is rarely available, the amount that the insurer would have to reimburse the cloud service provider could become so high as to jeopardise the insurer's own financial stability.

In this study, we propose the adoption of catastrophe bonds as a reinsurance instrument. Specifically, we develop a closed-form formula to determine cat bond prices in the presence of stochastic interest rates. Furthermore, we demonstrate the practical applicability of our pricing formula in a real-world context.

Keywords: Catastrophe bonds, Cyber risks, Cyber Insurance.

9.1 Introduzione

Com'è noto, le interruzioni dei servizi cloud, soprattutto quelle di lunga durata, possono comportare significativi danni economici. Tra questi, perdita di entrate, spese per il ripristino dei servizi, passività contrattuali con i clienti e potenziale perdita di reputazione, che a sua volta può portare alla perdita di clienti. Di conseguenza, il totale delle perdite a cui un fornitore di servizi cloud può andare incontro può facilmente raggiungere centinaia di migliaia di dollari per ogni minuto di interruzione, come evidenziato in Pesola (2004); Mastroeni e Naldi (2007). D'altro canto, i clienti che sottoscrivono tali servizi si aspettano una qualità elevata e adeguata, che solitamente comprende alcune garanzie sulla disponibilità del servizio che è stato acquistato. Tale disponibilità è comunemente definita come la percentuale di tempo in cui il servizio cloud rimane accessibile ai clienti, come specificato in Xiaoyong *et al.* (2015) e Endo *et al.* (2016). Tuttavia, è stato riscontrato (si veda Adriani e Naldi, 2019; Nabi *et al.* 2016; Bauer e Adams, 2012) che la disponibilità effettiva del servizio offerto può risultare inferiore rispetto alle aspettative dei clienti. In particolare, le garanzie offerte sono specificate negli Accordi di Livello di Servizio (noti come Service Level Agreement, SLA). Per i dettagli si analizzino i numerosi articoli presenti in letteratura (ad esempio, Alhamad *et al.* 2010; Pankesh *et al.* 2009; Hussain *et al.* 2017; Mubeen *et al.* 2018). Questi accordi definiscono gli obblighi imposti dal fornitore di servizi cloud nei confronti dell'acquirente del servizio, stabilendo un insieme di metriche di qualità e di vincoli da rispettare. Naturalmente, è fondamentale monitorare l'ottemperanza da parte dei fornitori di servizi cloud a questi impegni contrattuali, come indicato in Nawaz *et al.* (2017) nella ricerca del 2017. A questo scopo, in letteratura sono presenti diverse soluzioni (Alboghady *et al.* 2017; Stephen *et al.* 2019; Syed *et al.* 2017; Shang *et al.* 2020). Gli strumenti proposti devono misurare una serie di parametri legati alla cosiddetta Qualità del Servizio (denominati Quality of Service, QoS) e confrontare tali valori con le specifiche stabilite negli Accordi di Livello di Servizio. Qualora le condizioni concordate negli SLA vengano violate o non pienamente rispettate, il fornitore di servizi cloud è tenuto a pagare penali e/o a compensare la perdita subita dal cliente, come indicato anche in Xiaoyong *et al.* (2015). È importante sottolineare che, qualora tali violazioni si verificassero su vasta scala, le penali e le compensazioni potrebbero mettere a rischio l'equilibrio economico del fornitore di servizi cloud.

Inutile sottolineare come, in generale, la valutazione e la capacità di gestione di situazioni a rischio costituiscano pilastri essenziali per le aziende. In particolare, nell'ambito del problema in esame, sono strumenti fondamentali per affrontare in modo efficace eventuali interruzioni del servizio e conseguenti perdite economiche, come osservato in Marotta *et al.* (2017) e Paté-Cornell *et al.* (2018). Il fornitore di servizi cloud, per migliorare la qualità e l'affidabilità del proprio servizio, può investire nella propria infrastruttura riducendo di conseguenza le possibili perdite previste. Tuttavia, questa misura è solo una misura di mitigazione del rischio che spesso non è in grado di prevenire completamente le perdite più ingenti e/o estreme, come si può evincere in Mazzoccoli e Naldi (2020) e Mazzoccoli (2023).

Una strategia di protezione completa o parziale dalle perdite economiche derivanti dalle perdite dirette e/o dalle penalità da pagare ai clienti a seguito dell'applicazione degli SLA, è l'assicurazione, cioè il trasferimento del rischio a seguito del pagamento di un premio assicurativo. In ambito informatico, la scarsità dei dati a disposizione rende complesso stabilire il premio adeguato da addebitare ai fornitori di servizi cloud al fine di coprire le loro potenziali perdite. La determinazione del valore monetario e nella tariffazione delle polizze assicurative per i servizi cloud è stata oggetto di discussione in alcuni articoli presenti nella letteratura specialistica (si veda ad esempio Mastroeni *et al.* 2019; Naldi e Mazzoccoli, 2018). Tuttavia, il trasferimento del rischio all'assicuratore pone quest'ultimo in una situazione critica e a sua volta di rischio, nel caso di perdite catastrofiche (Khalili *et al.* 2019). A sua volta, dunque, una compagnia assicurativa può ricorrere alla stessa strategia trasferendo il proprio rischio su un'altra compagnia assicurativa che prende il nome di *riassicurazione*. Sfortunatamente, esistono poche opzioni di riassicurazione cibernetica disponibili (Marotta *et al.* 2017), e anche quelle esistenti mostrano resistenza nel fornire copertura a causa dell'incertezza associata a eventi rischiosi di questo genere.

In aggiunta, i tradizionali meccanismi assicurativi non sono idonei a gestire perdite di tale portata. Una singola catastrofe cibernetica (causata appunto da rischi di tipo informatico) potrebbe mettere a repentaglio le riserve finanziarie o persino portare alla bancarotta delle compagnie di assicurazione. Di conseguenza, le compagnie assicurative specializzate in ambito cibernetico necessitano di nuovi e innovativi strumenti di trasferimento del rischio.

I cosiddetti *catastrophe bond* o *cat bond*, costituiscono un'alternativa ai tradizionali strumenti di riassicurazione per affrontare problemi derivanti da eventi catastrofici di natura cibernetica. Nella letteratura finanziaria, sono stati presentati vari studi sulla tariffazione dei cat bond, con approcci molto diversificati. Ad esempio, lavori come Cox e Pedersen (2000) e Reshetar (2008) si basano su processi stocastici a tempo discreto, mentre diversi approcci a tempo continuo possono essere trovati in Burnecki e Kukla (2003) e Härdle e Cabrera (2010). Diversamente, in Vaugirard (2003), l'autore utilizza un approccio basato su strategie di arbitraggio per stabilire i prezzi dei cat bonds. Altri studi presenti nella letteratura scientifica, come ad esempio Baryshnikov *et al.* (2001) e Unger (2010), trattano argomenti simili, ma non si adattano in modo ottimale al nostro specifico problema. Un altro interessante approccio alla determinazione dei prezzi delle obbligazioni catastrofiche è stato adottato negli articoli Nowak e Romaniuk (2013) e Ma e Ma (2013). Nel primo studio, i cat bond vengono valutati utilizzando i ben noti modelli di Vasicek, Hull-White e CIR. Nella valutazione della tariffazione del bond, essi assumono che l'occorrenza della catastrofe informatica sia indipendente dal comportamento dei mercati finanziari. Inoltre, in questi articoli, sono state ottenute formule di tariffazione del bond attraverso simulazioni Monte Carlo utilizzando prima una funzione a gradini e, successivamente, una funzione lineare come funzioni payoff associate al cat bond. Invece, gli autori del secondo lavoro, pur seguendo un approccio simile agli autori precedentemente citati (utilizzando il modello CIR), non forniscono una formula chiusa per la determinazione dei prezzi.

In questo articolo, esaminiamo il tema dello sviluppo di un meccanismo di riassicurazione per i servizi cloud basato su cat bond, e presentiamo i principali contributi della nostra ricerca nei seguenti punti:

- introduciamo i cat bond nel contesto informatico, nello specifico contesto dei servizi cloud (Sezioni 9.2 e 9.3);
- forniamo formule chiuse per il pricing dei cat bond, seguendo l'approccio di Nowak e Romaniuk, utilizzando i modelli per i tassi di Vasicek e CIR (Sezioni 9.4, 9.5 e 9.6);
- illustriamo l'applicazione delle formule di valutazione in un contesto realistico, utilizzando statistiche di guasti dal mondo reale (Sezione 9.7).

9.2 Cat Bonds applicati ai Servizi Cloud

I cat bond sono stati ideati come un meccanismo di riassicurazione per coprire le perdite dovute a catastrofi naturali. In questa sezione, illustriamo come possiamo applicarli ai servizi cloud.

Come accennato brevemente nell'Introduzione, un fornitore di servizi cloud offre un servizio che può consistere nell'archiviazione remota dei file del cliente o nell'esecuzione remota di programmi. I file da archiviare e i programmi da eseguire risiedono nel data center del fornitore di servizi cloud, e i clienti vi accedono tramite una connessione di rete ai server del fornitore di servizi cloud. Il servizio è soggetto a interruzioni dovute a cause accidentali (ad esempio l'interruzione del servizio elettrico) o intenzionali (ad esempio, dipendenti che cercano di sabotare l'azienda, oppure attacchi da parte di criminali informatici, vedi Elnagdy *et al.* (2016), Gunawi *et al.* (2016). Nello specifico, in questo articolo, ci concentriamo su guasti accidentali. Le principali cause di interruzione del servizio sono i guasti dell'infrastruttura (sottosistema di alimentazione, sottosistema di raffreddamento, sottosistema IT, server e rete), errori di pianificazione, errori umani (come la configurazione errata), errori software e test periodici di manutenzione preventiva (Endo *et al.* 2017, Mesbahi *et al.* 2018). Un'analisi accurata degli incidenti accaduti al cloud e in seguito segnalati dai clienti è stata effettuata in Fiondella *et al.* (2013).

Sebbene le interruzioni possano riguardare parti del sistema e quindi comportare un degrado della qualità del servizio anziché un completo arresto (si veda Bauer e Adams 2012) in questo articolo consideriamo il servizio fornito dal fornitore di servizi cloud come una variabile binaria, ovvero il servizio può essere ON (attivo) o OFF (non attivo). Possiamo sempre tornare a questo schema fissando una soglia sulla qualità del servizio in modo che sia dichiarata un'interruzione qualora i parametri di qualità del servizio scendono al di sotto di quella soglia. In base a questa assunzione, lo stato del servizio cloud è una sequenza di periodi alternati ON e OFF.

Le interruzioni producono perdite economiche sia per il fornitore di servizi cloud (vedere, ad esempio, l'analisi condotta da Ponnemon 2012) che per il cliente. Nel caso dei clienti aziendali, una fonte significativa di perdite è dovuta alla mancata generazione di entrate durante l'interruzione. Questa perdita può essere stimata approssimativamente in proporzione alle entrate annuali associate alla durata dell'interruzione e, per grandi aziende (come Amazon), può ammontare a centinaia di migliaia di dollari al minuto.

Se il fornitore di servizi cloud non è in grado di fornire il servizio a causa di un'interruzione, può essere chiamato a risarcire finanziariamente i clienti per le perdite da loro subite, in accordo a quanto riportato nelle disposizioni degli SLA. Una clausola tipica negli SLA è quella relativa alla violazione degli impegni di disponibilità, sebbene possano essere considerati anche altri impegni, come il numero di interruzioni o il numero di lunghe interruzioni (Mastroeni e Naldi 2011).

Di conseguenza, un'interruzione prolungata del servizio può persino portare a una perdita catastrofica. Infatti, il fornitore di servizi cloud può essere chiamato a restituire al cliente fino al 50% di quanto pagato per il servizio. Nel caso di un'interruzione estesa nel tempo, i rimborsi possono facilmente erodere il margine di profitto e portare a conseguenze catastrofiche per il fornitore di servizi cloud.

Tuttavia, i fornitori di servizi cloud possono apportare investimenti nella propria infrastruttura e migliorare la loro disponibilità come contromisura per ridurre tali perdite. La gestione del rischio può includere l'attuazione di misure di trasferimento del rischio, come ad esempio la sottoscrizione di polizza assicurativa (Cholda *et al.* 2013). Gli investimenti nella sicurezza informatica possono essere impiegati anche per ridurre il premio assicurativo, come mostrato per la cybersecurity in Mazzoccoli e Naldi (2020, 2021, 2022); Young *et al.* (2016). Tuttavia, i rimborsi devono essere significativamente limitati affinché i meccanismi assicurativi siano sostenibili (si veda Mastroeni *et al.* 2019). Se ciò non fosse possibile o non fosse accettabile per i clienti, l'assicuratore potrebbe dover ricorrere ad un livello assicurativo aggiuntivo, per proteggersi dal rischio di perdite ingenti, proprio come lo stesso fornitore di servizi cloud. Dunque, l'assicuratore può trasferire il proprio rischio ad una compagnia di riassicurazione a fronte di una somma in denaro (premio), ma, in assenza di schemi di riassicurazione consolidati, l'assicuratore deve prevedere alternative per il trasferimento del proprio rischio: ad esempio, l'assicuratore potrebbe prevedere di ricorrere ai cat bond (Mastroeni *et al.* 2022).

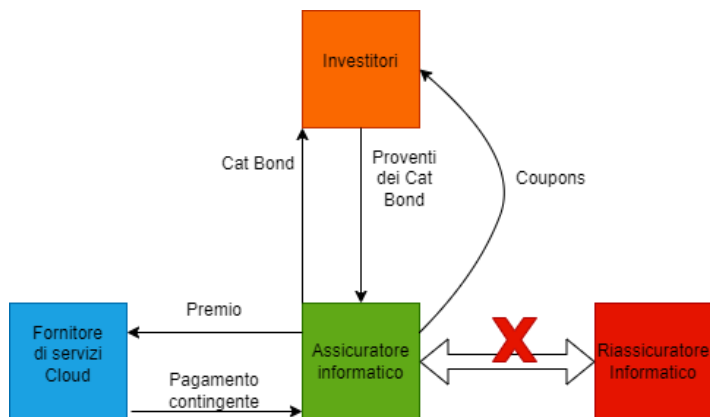
L'assicuratore emette cat bond per coprire le perdite e, in particolare, nel contesto dei servizi cloud, questi ultimi funzionano nel modo riportato di seguito:

- se le perdite dovute alle interruzioni rimangono al di sotto di una certa soglia prefissata (cioè se non si verifica un evento catastrofico), l'assicuratore paga agli investitori (cioè agli sottoscrittori dei bond) un coupon;
- se si dovesse verificare uno o più eventi catastrofici che causano

notevoli perdite all'assicuratore, i sottoscrittori dei bond subiscono una diminuzione dei proventi proporzionale alle perdite.

Nella Figura 9.1, mostriamo un esempio dei flussi di cassa coinvolti nell'assicurazione e nell'emissione di cat bond. In basso a sinistra (in celeste), il fornitore di servizi cloud sottoscrive una polizza assicurativa per coprire eventuali rischi futuri pagando all'assicuratore (in verde) un importo monetario chiamato premio. Nel caso in cui ci siano difficoltà nel sottoscrivere una polizza riassicurativa (in rosso), l'assicuratore può emettere cat bonds per coprire le perdite dovute a grandi richieste di risarcimento assicurativo per i servizi cloud.

Figura 9.1
Flussi di cassa: fornitore di servizi cloud, assicuratore informatico, riassicuratore informatico e investitori



Fonte: elaborazione degli autori

Se si dovesse verificare un evento catastrofico, l'assicuratore dovrà compensare il fornitore di servizi cloud per le perdite causate dalle richieste dei clienti, il che, però, può essere affrontato solamente affidandosi agli introiti raccolti attraverso l'emissione di detti cat bonds. D'altra parte, se non si dovesse verificare un evento catastrofico, non ci sarebbero richieste e quindi nessuna copertura delle perdite del fornitore di servizi cloud. In tal caso l'assicuratore dovrà pagare ai suoi sottoscrittori dei bond (in arancione) il valore nominale del bond aggiungendo un coupon alla fine della scadenza del bond stesso.

9.3 Modelli per descrivere lo stato di funzionamento del servizio cloud

Un aspetto fondamentale per calcolare accuratamente il prezzo del cat bond è il ricorso ad un modello probabilistico dello stato dei servizi cloud, il quale descriva se il cloud è disponibile o non disponibile. Considerare il processo ON-OFF equivale ad avere un modello di probabilità per la durata dei periodi ON (tempo di funzionamento del servizio) e OFF (tempo di non funzionamento del servizio). Di seguito, assumiamo che la durata del periodo di tempo necessario per far tornare il cloud operativo OFF, non sia correlata alla durata del periodo di funzionamento ON, e viceversa. Assumiamo anche che i tempi di inizio e fine dei due periodi possano essere identificati in modo preciso ed esatto. La problematica legata alla disponibilità del servizio cloud è stata oggetto di un approfondito studio nel lavoro di ricerca condotto da Hogben e Pannetrat (2013), nel quale sono state esaminate diverse definizioni operative di disponibilità. Di seguito, mostriamo brevemente i modelli dei periodi di stato ON-OFF del servizio cloud che compaiono nella letteratura scientifica.

In particolare, nella letteratura scientifica sono stati proposti i seguenti modelli statistici per descrivere la durata dei periodi ON e OFF:

Tabella 9.1 – Valori stimati dei parametri nel modello esponenziale-Pareto

Fornitore servizi	Esponenziale	Pareto	
	$1/\lambda$ [days]	δ	ζ
Amazon	85.6	276.43	-0.12
Azure	36.67	312.32	-0.35
Google	27.53	405.29	0.39

Fonte: elaborazione degli autori

- Modello esponenziale-esponenziale (o esponenziale-Poisson), analizzato ed impiegato nel lavoro Mastroeni e Naldi (2011);
- Modello esponenziale-Pareto (o Poisson-Pareto), proposto nei lavori Mastroeni e Naldi (2011); Mastroeni *et al.* (2019) costruito sulla base di un insieme di dati sulle interruzioni segnalate dai clienti per cinque importanti fornitori di servizi cloud (Google, Amazon, Rackspace, Salesforce, Windows Azure);

- Modello Pareto-lognormale, introdotto nell'articolo Dunne e Malone (2017) è utilizzato per rappresentare i risultati di un'indagine di misurazione condotta presso una piccola impresa che gestisce la propria infrastruttura cloud.

Anche se l'approccio che proponiamo è piuttosto generale, in questo articolo, adottiamo il modello esponenziale-Pareto che ci consente di ottenere espressioni analitiche chiuse per il prezzo del cat bond. La nostra scelta è legata al fatto che il modello esponenziale-Pareto è stato stabilito osservando la coda della durata OFF, ad esempio gli eventi estremi contro i quali il sistema di riassicurazione desidera difendersi.

Di seguito, indichiamo la durata degli stati ON con A e la durata degli stati OFF con D . La funzione di distribuzione cumulativa dei due periodi ON e OFF è la seguente:

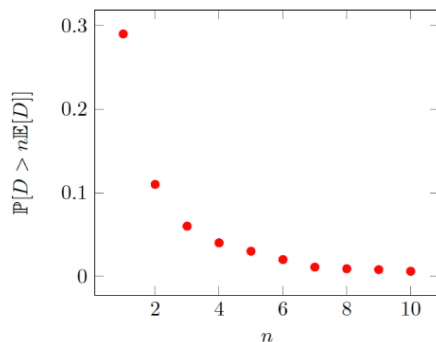
$$\begin{aligned}
 F_A(x) &= \mathbb{P}[A < x] = 1 - \lambda e^{-\lambda x} \\
 F_D(x) &= \mathbb{P}[D < x] = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\zeta x}{\delta}\right)^{-\frac{1}{\zeta}} & \text{se } \zeta \neq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x}{\delta}} & \text{se } \zeta = 0 \end{cases} \quad (9.1)
 \end{aligned}$$

dove λ è il parametro della distribuzione esponenziale e δ e ζ sono i parametri di forma e scala della distribuzione di Pareto generalizzata GPD.

I valori ottenuti per i parametri delle due distribuzioni sono riportati nella Tabella 9.1.

Poiché il nostro intento è stabilire il prezzo di un cat bond per coprire perdite estreme, siamo interessati a valutare quanto siano probabili perdite ingenti in questo contesto. A tale scopo, calcoliamo la probabilità di perdite superiori rispetto ad un certo multiplo n ($n \in \mathbb{N}$) della perdita media subita, ovvero $\mathbb{P}[D > nE[D]]$. Nella Figura 9.2, possiamo osservare che la probabilità che un'interruzione possa causare una perdita almeno due volte superior alla Perdita media è del 12%. Sebbene la probabilità di perdite ingenti diminuisca rapidamente, si può osservare che la probabilità di perdite superiori a cinque volte la perdita media è ancora significativa, pari al 2,5%.

Figura 9.2
*Probabilità che vengano subite perdite ingenti
 in funzione del numero di volte di avvenuto disservizio con la perdita media*



Fonte: elaborazione degli autori

9.4 Formula chiusa per la valutazione del Prezzo del Cat Bond

Come indicato nell'Introduzione, in questo articolo abbiamo ottenuto una formula chiusa per valutare il prezzo del cat bond per i servizi cloud, prendendo spunto dal lavoro Nowak e Romaniuk (2013). In particolare, nel loro articolo, gli autori hanno proposto una formula generale per la valutazione del cat bond, ma a causa delle difficoltà nel gestire la distribuzione delle perdite e degli eventi di perdita, non hanno potuto produrre una formula chiusa. Di fatto, si sono affidati a risultati numerici basati su simulazioni Monte Carlo per mostrare i risultati ottenuti dalla teoria. Nello specifico, in questa sezione, richiamiamo la loro formula di valutazione del cat bond e la adattiamo al contesto dei servizi cloud.

9.4.1 Cat Bond e formulazione del modello

Come indicato nella Sezione 9.3, abbiamo adottato il modello Poisson-Pareto per descrivere lo stato del servizio cloud. Poiché ci preoccupiamo delle perdite subite dall'assicuratore, dobbiamo metterle in relazione con le perdite subite dal provider di servizi cloud attraverso il processo di richiesta di risarcimento. Nell'articolo Mastroeni *et al.* (2019) sono state utilizzate tre metriche specifiche di qualità del servizio (QoS) per descrivere come le interruzioni del servizio portino a richieste di risarcimento (e di conseguenza perdite economiche) per il fornitore di servizi cloud. Nello specifico, le metriche utilizzate sono, rispettivamente, il numero di interru-

zioni, il numero di interruzioni prolungate (nel tempo) e il tempo complessivo di indisponibilità del servizio.

Se il contratto stipulato tra il cliente e il fornitore di servizi cloud viene stipulato utilizzando il numero di interruzioni come condizione, il cliente riceve un risarcimento per ogni interruzione avvenuta nell'arco temporale di validità del contratto. Se il numero di interruzioni prolungate viene scelto come condizione, il cliente viene risarcito ogni volta che la durata dell'interruzione supera una determinata soglia di tempo. Il risarcimento non dipende dalla durata effettiva dell'interruzione, purché sia maggiore della soglia fissata. Infine, se la indisponibilità complessiva rappresenta la condizione, il risarcimento è proporzionale alla somma delle durate delle interruzioni.

Come accennato in precedenza, in questo articolo abbiamo adottato il numero di interruzioni prolungate del servizio come condizione di base delle richieste di risarcimento, poiché eravamo interessati agli eventi estremi (che sono i più dannosi per i fornitori e portano a conseguenze catastrofiche).

Iniziamo dunque a formalizzare il problema. Definiamo con T la durata del contratto stipulato al tempo $t = 0$, in modo che l'intervallo di validità sia $\mathbf{T} = [0, T]$ e consideriamo $t \in \mathbf{T}$. Definiamo inoltre $(X_i)_{i=1}^{\infty} = (\rho_{ij} \mathbf{1}_{[D_i > \omega]})_{i=1}^{\infty}$ come una sequenza di variabili casuali indipendenti e identicamente distribuite che descrivono le perdite subite dal fornitore di servizi cloud durante l' i -esimo evento catastrofico.

Nello specifico, la variabile D_i descrive il periodo di indisponibilità del servizio cloud, ρ_{ij} è una costante reale positiva che si riferisce alla perdita per lunga interruzione, mentre ω è una soglia imposta sulla durata delle interruzioni per dar luogo a un reclamo da parte dell'acquirente del servizio, e $\mathbf{1}_{[*]}$ è la funzione indicatrice definita nel seguente modo:

$$\mathbf{1}_{[D > \omega]} = \begin{cases} 1 & \text{se } D > \omega \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (9.2)$$

$$N(0) = 0$$

$$\mathbb{E}[N(t)] = \lambda t$$

$$\mathbb{P}(N(t_1) - N(t_2) = k) = e^{-\lambda(t_1 - t_2)} \frac{[\lambda(t_1 - t_2)]^k}{k!}$$
$$k \in \{0, 1, 2, \dots\} \tag{9.3}$$

Grazie alla nostra scelta del modello Poisson-Pareto, possiamo descrivere il numero di eventi catastrofici fino al momento t , $t \in \mathbf{T}$, attraverso un processo di Poisson omogeneo $N(t)$ di intensità λ . I salti del processo $N(t)$ si verificano se avviene un evento di tipo catastrofico. Dunque, valgono le seguenti proprietà per il processo $N(t)$:

Seguendo l'approccio adottato nell'articolo Mastroeni e Naldi (2017) possiamo definire la perdita totale subita dal fornitore di servizi cloud come la perdita proporzionale al numero di interruzioni prolungate, ovvero:

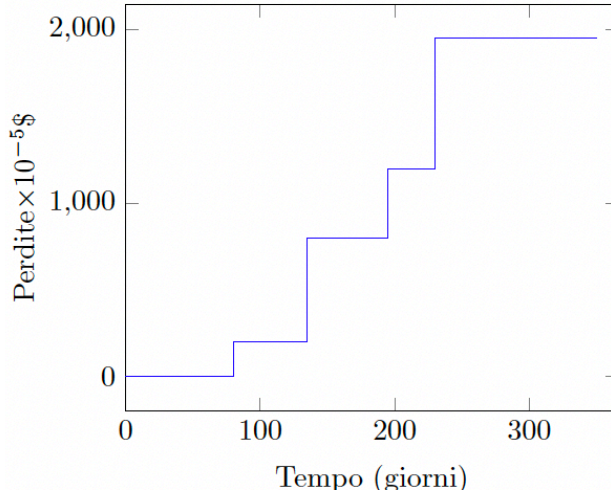
$$X(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} X_i = \rho t f \sum_{i=1}^{N(t)} \mathbf{1}_{[D_i > \omega]}. \tag{9.4}$$

A causa dell'indennizzo totale del fornitore di servizi cloud, la quantità $X(t)$ nell'equazione (9.4) rappresenta anche la perdita subita dall'assicuratore.

Si tratta di un processo stocastico non decrescente (processo Poisson composto) con traiettorie a scalino e continue a destra. L'altezza dei salti del processo rappresenta la perdita economica subita a causa dell'evento catastrofico, come si può vedere nella Figura 9.3 in cui viene rappresentato un esempio di processo $X(t)$.

Figura 9.3

Esempio della dinamica che può seguire il processo $X(t)$ presente nell'equazione 9.4



Il processo descritto sopra è definito su uno spazio di probabilità filtrato $(\Omega, (\mathcal{F}_t)_{t \in \mathbf{T}}, \mathbb{P})$, in cui la filtrazione $(\mathcal{F}_t)_{t \in \mathbf{T}}$ è data da:

$$\mathcal{F}_t = \sigma(\mathcal{F}_t \cup \mathcal{F}_t^{**}) \quad (9.5)$$

dove $\mathcal{F}_t = \sigma(W(\tau), \tau \leq t)$ e $\mathcal{F}_t^{**} = \sigma(X(\tau), \tau \leq t)$, $t \in \mathbf{T}$, assumendo che $\mathcal{F}_0 = \sigma(F \in F: P(F) = 0)$ e $W(t)$ è un moto browniano.

Per costruire il cat bond, definiamo uno zero coupon bond con valore nominale $\mathbf{VN} = 1$ e scadenza al tempo T , il cui valore al tempo t è $B(t, T)$. Facciamo inoltre le seguenti ipotesi:

1. la dinamica del bond $B(t, T)$ è descritta da una ben nota equazione differenziale stocastica, ovvero:

$$dB(t, T) = B(t, T)(\mu(t)dt + \sigma(t)dW(t)) \quad (9.6)$$

dove $\mu(t)$ e $\sigma(t)$ sono rispettivamente il drift e la volatilità in funzione del tempo;

2. è soddisfatta la condizione di Novikov

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left(\frac{1}{2} \int_0^T M^2(t) dt \right) \right] < \infty \quad (9.7)$$

dove

$$M(t) = \frac{\mu(t) - r(t)}{\sigma(t)}$$

è il prezzo di mercato del rischio, r è il tasso di interesse privo di rischio, e \mathbb{Q} è la misura neutrale al rischio ottenuta utilizzando la derivata di Radon-Nikodym e il teorema di Girsanov (vedi Björk 2009 per ulteriori dettagli);

3. non esistono possibilità di arbitraggio sul mercato;
4. l'evento catastrofico, che nel nostro caso corrisponde all'interruzione dei servizi cloud, è indipendente dal comportamento dei mercati finanziari.

9.4.2 Proprietà del Cat Bond

Descriviamo ora alcune proprietà del cat bond preso in analisi, mettendole in relazione con processo di stato del servizio del cloud.

Introduciamo una sequenza di tempi di arresto che rappresentano i momenti in cui si verifica una catastrofe, cioè quando l'importo totale delle perdite $X(t)$ supera determinati livelli economici Λ_i

$$t_i(s) = \min\{\inf\{t \in \mathbf{T} : X(t) > \Lambda_i\}, T\}, \quad 1 \leq i \leq d, \quad (9.8)$$

dove

$$0 < \Lambda_1 < \Lambda_2 < \dots < \Lambda_d, \quad d > 1.$$

Successivamente, consideriamo un cat bond, che denotiamo con $B(t, T, \mathbf{VN})$, che ha un tempo di scadenza e pagamento in T , un valore nominale \mathbf{VN} , e che soddisfa le seguenti tre proprietà:

1. se il tempo in cui avviene il primo evento catastrofico, che denotiamo con t_1 , superasse il tempo di validità del contratto T ($t_1 \in \mathbf{T}$), il detentore del bond riceverebbe l'intero valore nominale \mathbf{VN} ;
2. se si verificasse un numero massimo d di catastrofi previste dal contratto entro il tempo di scadenza T , ovvero $t_d \in \mathbf{T}$, il detentore del cat

bond riceverebbe solo una parte dell'intero valore nominale \mathbf{VN} , ovvero il valore nominale meno la somma dei coefficienti in percentuale $\sum_{j=1}^d \eta_j$, dove $\eta_j \in [0, 1], j = 1, \dots, d$, con il vincolo che

$$\eta_1 \leq \eta_2 \leq \dots \leq \eta_d : \sum_{j=1}^d \eta_j \leq 1;$$

3. in caso contrario, se avvenissero k catastrofi, dove k non supera il numero massimo delle d catastrofi previste dal contratto, il detentore del bond riceve una frazione del valore nominale, che è il valore nominale meno la somma dei coefficienti in percentuale $\sum_{j=1}^d \eta_j$, con il vincolo introdotto nel punto precedente.

Tabella 9.2 – Riepilogo del profitto per il detentore di bond

Tempo di occorrenza	Profitto
$t_1 \notin \mathbf{T}$	\mathbf{VN}
$t_d \in \mathbf{T}$	\mathbf{VN} meno la somma dei coefficienti in percentuale $\sum_{j=1}^d \eta_j$
$t_k \in \mathbf{T} \wedge t_{k+1} \notin \mathbf{T}, k < d$	\mathbf{VN} meno la somma dei coefficienti in percentuale $\sum_{j=1}^k \eta_j$

Fonte: elaborazione degli autori

9.4.3 Pricing del Cat Bond

Per semplicità, useremo la notazione $B_T(t)$ per indicare il valore del bond

$$B_T(0) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left\{ - \int_0^T r(t) dt \right\} \middle| \mathcal{F}_t \right]. \quad (9.9)$$

al tempo t anziché la notazione $B(t, T)$. Partendo dalla formula presente nell'equazione (9.6) e utilizzando risultati ben noti e consolidati nella letteratura finanziaria (si vedano ad esempio Björk 2009 e Brigo e Mercurio 2006) otteniamo la formula di pricing per uno zero coupon bond al tempo $t = 0$ in base al valore nominale \mathbf{VN} .

Di conseguenza, utilizzando la procedura seguita in Vaugirard (2003) e Carmona e Leon (2007) e utilizzando le condizioni assunte dalla numero 1 alla numero 3, nell'articolo di Nowak e Romaniuk (2013) hanno ottenuto la seguente formula di pricing del catastrophe bond

$$B_T(0, \mathbf{VN}) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left\{ - \int_0^T r(t) dt \right\} \middle| \mathcal{F}_t \right] \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} [FP_B(T, \mathbf{VN})]. \quad (9.10)$$

dove $FP_B(\cdot)$ è la funzione di payoff.

Grazie all'assunzione numero 9.4, è possibile rappresentare la formula precedente (ovvero l'equazione (9.10)) nel modo seguente:

$$B_T(0, \mathbf{VN}) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left\{ - \int_0^T r(t) dt \right\} FP_B(T, \mathbf{VN}) \middle| \mathcal{F}_t \right] \quad (9.11)$$

Possiamo osservare che il prezzo del bond nell'equazione (9.11) è il prodotto di due valori medi rispetto alla misura \mathbb{Q} , che chiamiamo rispettivamente Valor Medio dell'Esponenziale del Tasso di interesse (VMET) e Valor Medio della Funzione di Payoff (VMFP).

Si può notare che il VMET dipende dal tasso di interesse, mentre il VMFP dipende dalla funzione di payoff.

Ricordiamo che l'equazione (9.11) è valida sotto l'assunzione di Nowak e Romaniuk che il consumo aggregato dipenda solo dalle variabili finanziarie.

Nel nostro caso, in cui la catastrofe è indipendente dal comportamento dei mercati finanziari, per ogni variabile aleatoria Z che dipende solo dalle variabili rischio catastrofico, si ha che $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[Z] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[Z]$ (per una dimostrazione dettagliata si veda Ma e Ma 2013 o Cox e Pedersen 2016). Dunque, possiamo asserire che l'equazione (9.11) è equivalente alla seguente:

$$B_T(0, \mathbf{VN}) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left\{ - \int_0^T r(t) dt \right\} \middle| \mathcal{F}_t \right] \mathbb{E}^{\mathbb{P}} [FP_B(T, \mathbf{VN})]. \quad (9.12)$$

9.5 Valutazione del Cat Bond nel modello Poisson-Pareto

Abbiamo definito la formula generale di pricing nell'equazione (9.10), e dobbiamo ora calcolare il VMET e il VMFP per ottenere il prezzo effettivo. In questa sezione, forniamo la formula chiusa finale per il prezzo di un cat bond relativo alle interruzioni dei servizi cloud nel modello Poisson-Pareto proposto.

9.5.1 Calcolo della funzione di distribuzione cumulativa dei t_i

Considerando la formula costruita da Nowak *et al.* 2011,

$$B_T(0, \mathbf{VN}) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left\{ \int_0^T r(t) dt \right\} \middle| \mathcal{F}_t \right] \mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T)). \quad (9.13)$$

otteniamo

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[FP_B(T, \mathbf{VN})] = \mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T)) \quad (9.14)$$

dove il termine $\mathbf{S}(T)$ è definito come la somma pesata delle funzioni cumulative di distribuzione \mathbf{S}_j dei tempi di arresto t_j .

$$\mathbf{S}(T) = \sum_{j=1}^d \eta_j \mathbf{S}_j(T) \quad (9.15)$$

dove \mathbf{S}_j vengono espressi dalla seguente equazione

$$\mathbf{S}_j(T) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^n}{n!} \mathbf{S}_{\bar{X}_n}(\Lambda_j) \quad (9.16)$$

dove $\mathbf{S}_{\bar{X}_n}$ è la CDF di $\bar{X}_n =: \sum_{i=0}^n \bar{X}_i$.

Prendendo in analisi il modello per la disponibilità del servizio cloud considerato in Sezione 9.3, possiamo osservare che il termine \mathbf{S}_j assume la seguente:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(T) = & \sum_{j=1}^d \eta_j \left[1 - \sum_{m=0}^{q_j} \sum_{n=m}^{\infty} \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^n}{n!} \binom{n}{m} \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{m}{\zeta}} \times \right. \\ & \left. \times \left[1 - \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{1}{\zeta}} \right]^{n-m} \right] \end{aligned} \quad (9.17)$$

Per poter calcolare la probabilità contenuta nell'equazione (9.17), definiamo

$$q_j := \left\lfloor \frac{\Lambda_j}{\rho_{lf}} \right\rfloor \in \mathbb{N},$$

otteniamo che

$$\begin{aligned} \mathbb{P} \left[\sum_{i=0}^n \mathbf{1}_{[D_i > \omega]} \leq \frac{\Lambda_j}{\rho_{lf}} \right] &= \mathbb{P} \left[\sum_{i=0}^n \mathbf{1}_{[D_i > \omega]} \leq q_j \right] = \sum_{m=0}^{q_j} \mathbb{P} \left[\sum_{i=0}^n \mathbf{1}_{[D_i > \omega]} = m \right] \\ &= \sum_{m=0}^{q_j} \binom{n}{m} \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{m}{\zeta}} \left[1 - \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{1}{\zeta}} \right]^{n-m} \end{aligned} \quad (9.18)$$

di conseguenza l'espressione per le funzioni di distribuzione cumulativa $\mathbf{S}_j(T)$ dei t_i è:

$$\mathbf{S}_j(T) = 1 - \sum_{m=0}^{q_j} \sum_{n=m}^{\infty} \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^n}{n!} \binom{n}{m} \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{m}{\zeta}} \left[1 - \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{1}{\zeta}} \right]^{n-m} \quad (9.19)$$

Sostituendo l'equazione (9.19) appena ottenuta nell'equazione (9.15), otteniamo l'espressione per $\mathbf{S}(T)$:

$$\begin{aligned}
S(T) = & \sum_{j=1}^d \eta_j \left[1 - \sum_{m=0}^{q_j} \sum_{n=m}^{\infty} \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^n}{n!} \binom{n}{m} \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{m}{\zeta}} \times \right. \\
& \left. \times \left[1 - \left(1 + \frac{\zeta \omega}{\delta} \right)^{-\frac{1}{\zeta}} \right]^{n-m} \right]
\end{aligned} \tag{9.20}$$

9.6 Modelli di tassi di interesse

In questa sezione introduciamo i modelli di tassi di interesse che verranno utilizzati nella Sezione 9.7. Nello specifico, in questa sezione, utilizziamo due modelli di tasso di interesse ben noti, il modello di Vasicek e il modello di Cox-Ingersoll-Ross.

9.6.1 Modello di Vasicek

Consideriamo inizialmente il modello di Vasicek per il tasso di interesse privo di rischio r . Il processo del tasso di interesse è mean reverting e segue la seguente equazione differenziale stocastica:

$$dr(t) = a(b - r(t))dt + \sigma dW(t), \tag{9.21}$$

dove a , b e σ sono costanti positive. In particolare:

1. σ è la volatilità ed è correlata all'ampiezza della casualità;
2. b è la media a lungo termine, cioè tutte le future traiettorie di $r(t)$ si evolveranno intorno al livello medio b ;
3. a è la velocità di riavvicinamento alla media b ;
4. $W(t)$ è un processo di Wiener e rappresenta il rischio di mercato casuale.

Assumendo il prezzo del mercato costante, $M(t) \equiv M$, e utilizzando questo modello per i tassi di interesse, possiamo scrivere:

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[\exp \left\{ - \int_0^T r(t) dt \right\} \right] = e^{-T\Omega(T, r(0))} \tag{9.22}$$

dove

$$\Omega(T, r(0)) = \Omega - \frac{1}{aT} \left[(\Omega - r(0))(1 - e^{-aT}) - \frac{\sigma^2}{4a^2} (1 - e^{-aT})^2 \right]$$

$$\Omega = b - \frac{M\sigma}{a} - \frac{\sigma^2}{2a^2} \quad (9.23)$$

Per ulteriori dettagli sul modello di Vasicek si possono consultare Vaugirard (2003), Björk (2009), Brigo e Mercurio (2007). La formula risultante per il cat bond, utilizzando il modello di Vasicek, può essere riscritta come:

$$B_T(0, \mathbf{VN}) = e^{-T\Omega(T, r(0))} \mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T)) \quad (9.24)$$

9.6.2 Modello CIR

Il modello di Cox-Ingersoll-Ross è un modello a un fattore che si riconduce al mean reverting, in cui il tasso di interesse istantaneo r soddisfa la seguente equazione differenziale stocastica:

$$dr(t) = a(b - r(t))dt + \sigma\sqrt{r(t)}dW(t) \quad (9.25)$$

dove a , b e σ sono costanti reali positive. I parametri nel modello CIR hanno un significato simile ai parametri nel modello di Vasicek:

1. σ è la volatilità;
2. b è la media del tasso di interesse;
3. a corrisponde alla velocità di adattamento alla media;
4. $W(t)$ è un processo di Wiener.

Assumendo che il prezzo del mercato è $M(t) = \frac{M}{\sigma}\sqrt{r(t)}$ e utilizzando questo modello di tasso di interesse otteniamo:

$$\mathbb{E}^Q \left[\exp \left\{ - \int_0^T r(t) dt \right\} \right] = U(T) e^{-V(T)r(0)} \quad (9.26)$$

dove

$$U(T) = \left[\frac{\alpha e^{\beta T}}{\beta(e^{\alpha T} - 1) + \alpha} \right]^{\varepsilon}$$

$$V(T) = \frac{e^{\alpha T} - 1}{\beta(e^{\alpha T} - 1) + \alpha}$$
(9.27)

$$\alpha = \sqrt{(a + M)^2 + 2\sigma^2}$$

$$\beta = \frac{1}{2}(a + M + \sqrt{(a + M)^2 + 2\sigma^2})$$

$$\varepsilon = \frac{2ab}{\sigma^2}$$

Utilizzando il modello CIR la formula finale risultante della valutazione del bond è dunque

$$B_T(0, \mathbf{VN}) = U(T)e^{-V(T)r(0)} \mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T))$$
(9.28)

9.7 Risultati numerici

In questa sezione, calcoliamo il valore del prezzo del bond dopo le statistiche sul fallimento del cloud riportate in Naldi (2013) per tre importanti aziende fornitori di servizi cloud: Amazon, Azure e Google.

In particolare, in questa sezione forniamo risultati numerici per la valutazione del cat bond nel caso dei due modelli di tassi di interesse considerati, ossia Vasicek e CIR. I parametri utilizzati in entrambi i modelli sono descritti in Episcopos (2000) e sono riportati nelle Tabelle 9.3 e 9.4. Sono basati su un tasso interbancario di un mese per gli Stati Uniti, come in Nowak e Romaniuk (2013).

Questo modo di impostare i parametri ci permette di confrontare i risultati ottenuti per i modelli di Vasicek e CIR e osservare l'impatto dei parametri a , b e σ sul prezzo del cat bond.

Tabella 9.3 – Parametri utilizzati per la valutazione del Cat Bond

Parametri	Valori
Numero di soglie d	2
Peso η_i	0.5
Prima soglia q_1	10
Seconda soglia q_2	15
Valore nominale \mathbf{VN}	1
Tempo di contratto T (anni)	1

Fonte: elaborazione degli autori

Iniziamo calcolando il valore residuo del valore nominale del cat bond, utilizzando i parametri nella Tabella 9.3, e successivamente applichiamo i due modelli di interesse stabiliti utilizzando i parametri nella Tabella 9.4.

9.7.1 Valore nominare residuo

In questa sottosezione dobbiamo calcolare il secondo fattore della formula del cat bond nell'equazione (9.13), ovvero il fattore che dipende dal modello utilizzato per descrivere i reclami e le perdite. Quindi, utilizzando l'equazione (9.15) e i parametri nella Tabella 9.3, otteniamo i seguenti valori nominali residui per le tre aziende di cloud provider, rispettivamente:

1. Amazon $\mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T)) = 0.9362;$
2. Azure $\mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T)) = 0.9619;$
3. Google $\mathbf{VN}(1 - \mathbf{S}(T)) = 0.7631.$

9.7.2 Prezzo del Cat Bond nel caso dei modelli Vasicek e CIR

Per la scelta dei parametri nella Tabella 4, possiamo osservare che si ottiene lo stesso valore sia per l'equazione (9.22) che per l'equazione (9.26):

$$e^{-T\Omega(T,r(0))} = U(T)e^{-V(T)r(0)} = 0.940533.$$

Quindi, utilizzando i valori nella Tabella 9.4 e i risultati trovati nella sottosezione 9.7.1, possiamo ottenere il valore dei prezzi del cat bond per le tre principali aziende fornitrici di servizi cloud:

Parametri	Vasicek	CIR
Velocità di reversione a	0.0235	0.0241
Livello medio b	0.055	0.054
Volatilità σ	0.01	0.014
Tasso di interesse $r(0)$	0.0614	0.0614

Fonte: elaborazione degli autori

Tabella 9.4 – Parametri considerati nel modello di Vasicek e nel modello di CIR per la valutazione dei cat bond

1. Amazon

$$B_T(0) = 0.9405326 \times 0.9362 = 0.8805;$$

2. Azure

$$B_T(0) = 0.9405326 \times 0.9619 = 0.9046;$$

3. Google

$$B_T(0) = 0.9405326 \times 0.7631 = 0.7177.$$

9.8 Conclusioni

Per loro natura, i rischi informatici possono comportare perdite molto elevate per le compagnie di assicurazione, le quali, eventualmente, possono ricorrere a pratiche di riassicurazione. Tuttavia, la mancanza di compagnie di riassicurazione specifiche del settore rende tale pratica di difficile attuazione. Si ravvede quindi la necessità di far ricorso a strumenti alternativi. In particolare, in questo articolo, abbiamo introdotto e studiato l'uso dei catastrophe bond come strategia alternativa. Visto che i rischi informatici condividono molte caratteristiche simili con le catastrofi naturali (cioè il campo di applicazione originale dei cat bond), abbiamo mostrato come essi possano essere utilizzati nel caso specifico della riassicurazione per far fronte ai disservizi del cloud, sempre più utilizzato e diffuso.

Ipotizzando un modello esponenziale-Pareto (o Poisson-Pareto) per descrivere l'occorrenza e la gravità delle perdite, abbiamo fornito formule chiuse per il prezzo del cat bond in un ambiente di tassi di interesse stocastici, in particolare utilizzando due noti modelli di tasso a un fattore (Vasicek e CIR). Successivamente, nella parte finale dell'articolo, abbiamo mostrato come i cat bond possano essere applicati in un contesto reale considerando tre grandi ed importanti aziende fornitrici di servizi cloud (Amazon, Azure e Google).

È importante sottolineare che la disponibilità di una formula chiusa per il prezzo rappresenta un passo cruciale per l'effettiva utilizzazione dei cat bond in ambito pratico.

Bibliografia

- Adriani, M., & Naldi, M. (2019, September). Whose fault is it? correctly attributing outages in cloud services. In *2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (pp. 433-440). IEEE.
- Alboghhdady, S., Winter, S., Taha, A., Zhang, H., & Suri, N. (2017). C'mon: Monitoring the compliance of cloud services to contracted properties. In *Proceedings of the 12th International Conference on Availability, Reliability and Security* (1-6).
- Alhamad, M., Dillon, T., & Chang, E. (2010, April). Conceptual SLA framework for cloud computing. In *4th IEEE international conference on digital ecosystems and technologies* (pp. 606-610). IEEE.
- Baryshnikov, Y., Mayo, A., & Taylor, D.R. (2001). Pricing of CAT bonds. *preprint*.
- Bauer, E., & Adams, R. (2012). *Reliability and availability of cloud computing*. John Wiley & Sons.
- Björk, T. (2009). *Arbitrage theory in continuous time*. Oxford university press.
- Brigo, D., & Mercurio, F. (2006). *Interest rate models-theory and practice: with smile, inflation and credit* (Vol. 2). Berlin: Springer.
- Burnecki, K., & Kukla, G. (2003). Pricing of zero-coupon and coupon CAT bonds. *Applicationes Mathematicae*, 30, 315-324.
- Carmona, J., & León, A. (2007). Investment option under CIR interest rates. *Finance Research Letters*, 4(4), 242-253.
- Cholda, P., Følstad, E.L., Helvik, B.E., Kuusela, P., Naldi, M., & Norros, I. (2013). Towards risk-aware communications networking. *Reliability Engineering & System Safety*, 109, 160-174.
- Cox, S.H., & Pedersen, H.W. (2000). Catastrophe risk bonds. *North American Actuarial Journal*, 4(4), 56-82.
- Dunne, J., & Malone, D. (2017). Obscured by the cloud: A resource allocation framework to model cloud outage events. *Journal of Systems and Software*, 131, 218-229.
- Elnagdy, S.A., Qiu, M., & Gai, K. (2016). Understanding taxonomy of cyber risks for cybersecurity insurance of financial industry in cloud computing. In *2016 IEEE 3rd international conference on cyber security and cloud computing (CSCloud)*(pp. 295-300). IEEE.
- Endo, P.T., Rodrigues, M., Gonçalves, G.E., Kelner, J., Sadok, D.H., & Curescu, C. (2016). High availability in clouds: systematic review and

- research challenges. *Journal of Cloud Computing*, 5(1), 1-15.
- Endo, P.T., Santos, G.L., Rosendo, D., Gomes, D.M., Moreira, A., Kelner, J., ... & Mahloo, M. (2017). Minimizing and managing cloud failures. *Computer*, 50(11), 86-90.
- Episcopos, A. (2000). Further evidence on alternative continuous time models of the short-term interest rate. *Journal of International Financial Markets, Institutions and Money*, 10(2), 199-212.
- Fiondella, L., Gokhale, S.S., & Mendiratta, V.B. (2013). Cloud incident data: An empirical analysis. In *2013 IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E)* (241-249). IEEE.
- Gunawi, H.S., Hao, M., Suminto, R.O., Laksono, A., Satria, A.D., Adityatama, J., & Eliazar, K.J. (2016). Why does the cloud stop computing? lessons from hundreds of service outages. In *Proceedings of the Seventh ACM Symposium on Cloud Computing* (1-16).
- Härdle, W.K., & Cabrera, B.L. (2010). Calibrating CAT bonds for Mexican earthquakes. *Journal of Risk and Insurance*, 77(3), 625-650.
- Hogben, G., & Pannetrat, A. (2013). Mutant apples: a critical examination of cloud SLA availability definitions. In *2013 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science* (Vol. 1, 379-386). IEEE.
- Hussain, W., Hussain, F.K., Hussain, O.K., Damiani, E., & Chang, E. (2017). Formulating and managing viable SLAs in cloud computing from a small to medium service provider's viewpoint: A state-of-the-art review. *Information Systems*, 71, 240-259.
- Khalili, M.M., Liu, M., & Romanosky, S. (2019). Embracing and controlling risk dependency in cyber-insurance policy underwriting. *Journal of Cyberse-curity*, 5(1), tyz010.
- Ma, Z.G., & Ma, C.Q. (2013). Pricing catastrophe risk bonds: A mixed approximation method. *Insurance: Mathematics and Economics*, 52(2), 243-254.
- Machiraju, S., & Gaurav, S. (2015). *Hardening azure applications*. Springer.
- Marotta, A., Martinelli, F., Nanni, S., Orlando, A., & Yautsiukhin, A. (2017). Cyber-insurance survey. *Computer Science Review*, 24, 35-61.
- Mastroeni, L., & Naldi, M. (2011). Network protection through insurance: Premium computation for the on-off service model. In *2011 8th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)* (46-53). IEEE.

- Mastroeni, L., & Naldi, M. (2011). Violation of service availability targets in service level agreements. In *2011 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (537-540). IEEE.
- Mastroeni, L., & Naldi, M. (2017). Insurance pricing and refund sustainability for cloud outages. In *Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services: 14th International Conference, GECON 2017, Biarritz, France, September 19-21, 2017, Proceedings 14* (3-17). Springer International Publishing.
- Mastroeni, L., Mazzoccoli, A., & Naldi, M. (2019). Service level agreement violations in cloud storage: Insurance and compensation sustainability. *Future Internet*, *11*(7), 142.
- Mastroeni, L., Mazzoccoli, A., & Naldi, M. (2022). Pricing Cat Bonds for Cloud Service Failures. *Journal of Risk and Financial Management*, *15*(10), 463.
- Mazzoccoli, A. (2023). Optimal Cyber Security Investment in a Mixed Risk Management Framework: Examining the Role of Cyber Insurance and Expenditure Analysis. *Risks*, *11*(9), 154.
- Mazzoccoli, A., & Naldi, M. (2020). Robustness of optimal investment decisions in mixed insurance/investment cyber risk management. *Risk analysis*, *40*(3), 550-564.
- Mazzoccoli, A., & Naldi, M. (2021). Optimal investment in cyber-security under cyber insurance for a multi-branch firm. *Risks*, *9*(1), 24.
- Mazzoccoli, A., & Naldi, M. (2022). Optimizing cybersecurity investments over time. *Algorithms*, *15*(6), 211.
- Mesbahi, M.R., Rahmani, A.M., & Hosseinzadeh, M. (2018). Reliability and high availability in cloud computing environments: a reference road-map. *Human-centric Computing and Information Sciences*, *8*, 1-31.
- Mubeen, S., Asadollah, S.A., Papadopoulos, A.V., Ashjaei, M., Pei-Breivold, H., & Behnam, M. (2017). Management of service level agreements for cloud services in IoT: A systematic mapping study. *IEEE access*, *6*, 30184-30207.
- Nabi, M., Toeroe, M., & Khendek, F. (2016). Availability in the cloud: State of the art. *Journal of Network and Computer Applications*, *60*, 54-67.
- Naldi, M. (2013). The availability of cloud-based services: Is it living up to its promise?. In *2013 9th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)* (pp. 282-289). IEEE.
- Naldi, M., & Mazzoccoli, A. (2018). Computation of the insurance pre-

- mium for cloud services based on fourth-order statistics. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 19, 1-6.
- Nawaz, F., Hussain, O.K., Janjua, N., & Chang, E. (2017, August). A proactive event-driven approach for dynamic QoS compliance in cloud of things. In *Proceedings of the International Conference on Web Intelligence (971-975)*.
- Nowak, P., & Romaniuk, M. (2013). Pricing and simulations of catastrophe bonds. *Insurance: Mathematics and Economics*, 52(1), 18-28.
- Nowak, P., Romaniuk, M., & Ermolieva, T. (2011). Evaluation of portfolio of financial and insurance instruments: Simulation of uncertainty. In *Managing Safety of Heterogeneous Systems: Decisions under Uncertainties and Risks* (351-366). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Paté-Cornell, M.E., Kuypers, M., Smith, M., & Keller, P. (2018). Cyber risk management for critical infrastructure: a risk analysis model and three case studies. *Risk Analysis*, 38(2), 226-241.
- Patel, P., Ranabahu, A.H., & Sheth, A.P. (2009). Service level agreement in cloud computing.
- Pesola, M. (2004). Network protection is a key stroke. *Financial Times, FT Business Continuity*, 9.
- Ponemon, L. (2016). Cost of data center outages. *Technical report, Ponemon Institute*.
- Reshetar, G. (2008). Pricing of multiple-event coupon paying CAT bond. *Available at SSRN 1059021*.
- Shang, R., Kauffman, R.J., Huang, J., & Yang, Y. (2020). Client risk informed-ness in brokered cloud services: An experimental pricing study. *Electronic Commerce Research and Applications*, 39, 100893.
- Stephen, A., Benedict, S., & Kumar, R.A. (2019). Monitoring IaaS using various cloud monitors. *Cluster Computing*, 22(Suppl 5), 12459-12471.
- Syed, H.J., Gani, A., Ahmad, R.W., Khan, M.K., & Ahmed, A.I.A. (2017). Cloud monitoring: A review, taxonomy, and open research issues. *Journal of Network and Computer Applications*, 98, 11-26.
- Unger, A.J. (2010). Pricing index-based catastrophe bonds: Part 1: Formulation and discretization issues using a numerical PDE approach. *Computers & geosciences*, 36(2), 139-149.
- Vaugirard, V.E. (2003). Pricing catastrophe bonds by an arbitrage approach. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 43(1), 119-132.

- Xiaoyong, Y., Hongyan, T., Ying, L., Tong, J., Tiancheng, L., & Zhonghai, W. (2015, June). A competitive penalty model for availability based cloud SLA. In *2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing* (964-970). IEEE.
- Xiaoyong, Y., Ying, L., Tong, J., Tiancheng, L., & Zhonghai, W. (2015, July). An analysis on availability commitment and penalty in cloud sla. In *2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference* (Vol. 2, 914-919). IEEE.
- Young, D., Lopez Jr., J., Rice, M., Ramsey, B., & McTasney, R. (2016). A framework for incorporating insurance in critical infrastructure cyber risk strategies. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, *14*, 43-57.