

# **POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Gestionale**



**Tesi di Laurea Magistrale**

## **APPLICAZIONE DI MODELLI PREVISIONALI IN AMBITO GESTIONALE ALLA DIFFUSIONE DI COVID-19**

**Relatore**

Prof.ssa Anna Corinna Cagliano

**Correlatore**

Prof. Giulio Mangano

**Candidata**

Chiara Drocco

Anno Accademico 2019/2020



*A papà, per avermi insegnato cosa significhi Amare,*

*A mamma, per avermene mostrata la bellezza,*

*Ai miei fratelli Francesco e Andrea, rocce a cui aggrapparmi sempre,*

*A Luca, al cui fianco è tutto speciale.*

*OMNIA VINCIT AMOR ET NOS CEDAMUS AMORI*

*(Publio Virgilio Marone, Bucoliche)*



## INDICE

|                                                                                                   |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Introduzione .....                                                                                | - 3 -  |
| 1 La Pandemia COVID-19: il fenomeno e i modelli evolutivi .....                                   | - 3 -  |
| 1.1 Descrizione dell'epidemia COVID-19 .....                                                      | - 3 -  |
| 1.2 Modelli di previsione della domanda presenti in letteratura .....                             | - 5 -  |
| 1.2.1 Metodi basati sulle serie temporali .....                                                   | - 6 -  |
| 1.2.2 Il metodo dello smorzamento esponenziale di Holt-Winters.....                               | - 6 -  |
| 1.2.3 Il metodo di Holt-Winters: considerazioni.....                                              | - 10 - |
| 1.3 Modelli di diffusione dell'innovazione presenti in letteratura .....                          | - 10 - |
| 1.3.1 La curva ad S di Tarde e la teoria della diffusione di Everett Rogers.....                  | - 11 - |
| 1.3.2 La curva logistica.....                                                                     | - 13 - |
| 1.3.3 Il modello di Gompertz.....                                                                 | - 14 - |
| 1.3.4 La curva logistica e il modello di Gompertz: considerazioni .....                           | - 16 - |
| 1.3.5 Il modello di Bass .....                                                                    | - 17 - |
| 1.3.6 Il modello di Bass: considerazioni .....                                                    | - 18 - |
| 1.4 System Dynamics.....                                                                          | - 20 - |
| 1.4.1 La scelta della metodologia System Dynamics: giustificazione attraverso la letteratura..... | - 20 - |
| 1.4.2 Storia .....                                                                                | - 21 - |
| 1.4.3 Descrizione della metodologia.....                                                          | - 22 - |
| 2 Pandemia COVID-19: dataset e analisi dati.....                                                  | 25     |
| 2.1 Raccolta dei dati su scala globale .....                                                      | 25     |
| 2.1.1 Correzioni apportate al dataset .....                                                       | 28     |
| 2.1.2 Limitazioni del dataset .....                                                               | 29     |
| 2.2 Analisi dell'andamento globale di contagi .....                                               | 29     |
| 3 Modelli SD creati, scenari ipotizzati e risultati ottenuti.....                                 | 40     |
| 3.1 Descrizione del modello SD per la diffusione del COVID-19.....                                | 40     |
| 3.2 Adattamento del modello SD ai casi di Spagna, Francia, Germania e USA.....                    | 46     |
| 3.2.1 Variabili da adattare ai modelli SD .....                                                   | 46     |
| 3.2.2 Calibrazione del modello SD per l'applicazione ai casi di studio.....                       | 47     |
| 3.4 Analisi di sensitività: creazione di tre scenari ipotetici.....                               | 62     |
| 3.4.1 Scenario 1: Lockdown .....                                                                  | 63     |
| 3.4.2 Scenario 2: Assenza di misure restrittive .....                                             | 66     |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 3.4.3 Scenario 3: Lockdown light.....    | 68 |
| 3.5 Risultati ottenuti .....             | 71 |
| 4 Conclusioni.....                       | 76 |
| 4.1 Benefici del lavoro di tesi.....     | 76 |
| 4.2 Limitazioni del lavoro di tesi ..... | 77 |
| 4.3 Spunti futuri di ricerca.....        | 78 |
| Appendice.....                           | 79 |
| Bibliografia.....                        | 82 |
| Sitografia .....                         | 84 |
| Ringraziamenti .....                     | 86 |

## FIGURE

|                                                                                                                                       |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <i>Figura 1: Classificazione dei metodi previsionali [5]</i> .....                                                                    | - 6 -  |
| <i>Figura 2: Raffigurazione della curva ad S di G. Tarde</i> .....                                                                    | - 11 - |
| <i>Figura 3: Curva a campana della diffusione di un'innovazione secondo E. Rogers, con la soglia critica di Moore [6]</i> .....       | - 12 - |
| <i>Figura 4: Esempio di curva logistica [7]</i> .....                                                                                 | - 14 - |
| <i>Figura 5 Esempio di curva di adozione istantanea e cumulativa nel modello di Gompertz. [8]</i> .....                               | - 15 - |
| <i>Figura 6: Grafico di confronto tra curva logistica e quella di Gompertz [8]</i> .....                                              | - 16 - |
| <i>Figura 7 : Curva di diffusione di un'innovazione secondo Bass [9]</i> .....                                                        | - 17 - |
| <i>Figura 8 Riepilogo delle decisioni chiave e delle rispettive tecniche di modellazione da utilizzare (Currie et al, 2020)</i> ..... | - 21 - |
| <i>Figura 9 Casual Loop Diagrams che mostra l'introduzione di un nuovo prodotto in un mercato. [11]</i> .....                         | - 22 - |
| <i>Figura 10: Esempio di Stocks and Flows Diagram [11]</i> .....                                                                      | - 23 - |
| <i>Figura 11 Grafico che mostra il numero di nuovi casi confermati di Covid-19 dal 27 gennaio 2020 al 31 maggio</i><br>.....          | 30     |
| <i>Figura 12: Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea del Pacifico Occidentale</i> .....                      | 31     |
| <i>Figura 13: Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Asia Sudorientale</i> .....                        | 31     |
| <i>Figura 14: Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Est Mediterraneo</i> .....                         | 32     |
| <i>Figura 15: Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Europa</i> .....                                   | 32     |
| <i>Figura 16: Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea delle Americhe</i> .....                                | 33     |
| <i>Figura 17: Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Africa</i> .....                                   | 33     |
| <i>Figura 18: Grafico raffigurante il numero di nuovi contagi giornalieri e cumulati di COVID-19 della Cina</i> .....                 | 34     |
| <i>Figura 19: Grafico raffigurante il numero totale di contagi, decessi e guariti di COVID-19 degli USA</i> .....                     | 35     |
| <i>Figura 20: Grafico che rappresenta il numero giornaliero di nuovi contagi registrati in Italia e negli USA</i> ....                | 36     |
| <i>Figura 21: Grafico che raffigura il numero di nuovi casi di COVID-19 giornalieri in India.</i> .....                               | 37     |
| <i>Figura 22: Grafico di confronto tra Russia, Italia, Regno Unito e Spagna riguardo ai numeri di decessi e contagi</i><br>.....      | 38     |
| <i>Figura 23: Finestra di input per l'inserimento delle impostazioni del modello</i> .....                                            | 41     |
| <i>Figura 24: Interfaccia grafica di VensimPLE raffigurante gli stock, il flow e alcune variabili ausiliarie</i> .....                | 42     |
| <i>Figura 25: Interfaccia grafica che mostra il modello in costruzione</i> .....                                                      | 43     |
| <i>Figura 26: Interfaccia grafica raffigurante il modello COVID-19 terminato</i> .....                                                | 45     |
| <i>Figura 27: Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale di popolazione spagnola</i> .....                               | 48     |
| <i>Figura 28: Interfaccia grafica per l'inserimento dei diversi impulsi settimanali nel caso spagnolo</i> .....                       | 48     |
| <i>Figura 29: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori desiderati di frequenza dei contatti in Spagna.</i> .....              | 49     |
| <i>Figura 30: Grafico che rappresenta l'andamento simulato del caso Spagna</i> .....                                                  | 49     |
| <i>Figura 31: Interfaccia grafica che mostra il modello SD Spagna simulato con SyntheSim</i> .....                                    | 50     |
| <i>Figura 32: Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale della popolazione francese</i> .....                            | 51     |
| <i>Figura 33: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori attribuiti all'Infectivity della Francia</i> .....                     | 52     |

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figura 34: Interfaccia grafica per la calibrazione dei valori da assegnare alla Contact Frequency nel caso Francia</i>                                | 52 |
| <i>Figura 35: Grafico che rappresenta l'andamento simulato del caso Francia</i>                                                                          | 53 |
| <i>Figura 36: Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale della popolazione tedesca</i>                                                      | 54 |
| <i>Figura 37: Interfaccia grafica per l'inserimento degli impulsi stimati di infettività nel caso della Germania</i>                                     | 55 |
| <i>Figura 38: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori da assegnare alla Contact Frequency nel caso della Germania</i>                           | 55 |
| <i>Figura 39: Grafico che rappresenta l'andamento simulato del caso Germania</i>                                                                         | 56 |
| <i>Figura 40: Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale di abitanti degli USA</i>                                                          | 57 |
| <i>Figura 41: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori stimati dell'infettività nel caso degli Stati Uniti</i>                                   | 57 |
| <i>Figura 42: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori da assegnare alla Contact Frequency nel caso degli USA</i>                                | 58 |
| <i>Figura 43: Grafico che rappresenta l'andamento simulato degli USA</i>                                                                                 | 58 |
| <i>Figura 44: Grafico che rappresenta il numero di casi cumulati per i diversi Paesi in esame, ottenuti con la simulazione dei rispettivi modelli SD</i> | 59 |
| <i>Figura 45: Grafico di confronto tra l'andamento del COVID-19 reale e quello simulato nel caso della Spagna</i>                                        | 60 |
| <i>Figura 46: Grafico di confronto tra l'andamento reale e quello simulato nel caso Francia</i>                                                          | 61 |
| <i>Figura 47: Grafico di confronto tra l'andamento reale e quello simulato nel caso Germania</i>                                                         | 61 |
| <i>Figura 48: Grafico di confronto tra l'andamento reale e quello simulato nel caso USA</i>                                                              | 62 |
| <i>Figura 49: Andamento simulato del primo scenario per la Spagna e andamento base</i>                                                                   | 64 |
| <i>Figura 50: Andamento simulato del primo scenario per la Francia e andamento base</i>                                                                  | 64 |
| <i>Figura 51: Andamento simulato del primo scenario per la Germania e andamento base</i>                                                                 | 65 |
| <i>Figura 52: Andamento simulato del primo scenario per gli USA e andamento base</i>                                                                     | 65 |
| <i>Figura 53: Andamento simulato del secondo scenario per la Spagna e andamento base</i>                                                                 | 66 |
| <i>Figura 54: Andamento simulato del secondo scenario per la Francia e andamento base</i>                                                                | 67 |
| <i>Figura 55: Andamento simulato del secondo scenario per la Germania e andamento base</i>                                                               | 67 |
| <i>Figura 56: Andamento simulato del secondo scenario per gli USA e andamento base</i>                                                                   | 68 |
| <i>Figura 57: Andamento simulato del terzo scenario per la Spagna e andamento base</i>                                                                   | 69 |
| <i>Figura 58: Andamento simulato del terzo scenario per la Francia e andamento base</i>                                                                  | 69 |
| <i>Figura 59: Andamento simulato del terzo scenario per la Germania e andamento base</i>                                                                 | 70 |
| <i>Figura 60: Andamento simulato del terzo scenario per gli USA e andamento base</i>                                                                     | 70 |
| <i>Figura 61: Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base della Spagna</i>                                                                     | 72 |
| <i>Figura 62: Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base della Francia</i>                                                                    | 73 |
| <i>Figura 63: Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base della Germania</i>                                                                   | 74 |
| <i>Figura 64: Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base degli USA</i>                                                                        | 75 |



## TABELLE

|                                                                                                       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tabella 1: Lista dei Paesi in ordine alfabetico registrati nel dataset .....</i>                   | <i>26</i> |
| <i>Tabella 2: Analisi delle variabili presenti nel dataset .....</i>                                  | <i>28</i> |
| <i>Tabella 3: Numero dei casi confermati di COVID-19 divisi per macroarea al 31 maggio 2020 .....</i> | <i>30</i> |

# Introduzione

In questo lavoro di tesi, viene trattato il fenomeno molto attuale del Covid-19, malattia infettiva ormai diffusa globalmente e dichiarata pandemia nel mese di marzo 2020.

L'obiettivo del seguente elaborato è riuscire ad individuare un modello di previsione della domanda o di diffusione dell'innovazione, usato in ambito della gestione d'impresa, che simulato tramite l'opportuna metodologia, sia idoneo e meglio si applichi a descrivere l'evoluzione nel tempo del COVID-19, dimostrando così come un siffatto genere di modelli possa essere adattato anche all'analisi della diffusione di tale pandemia.

Inizialmente si esplora questa tematica andando a studiare gli aspetti chiave di diffusione dell'epidemia e esponendone le principali caratteristiche. Lo scopo principalmente descrittivo della prima parte di elaborato riguardante l'epidemia consente di introdurre e mettere a fuoco il passo successivo: l'individuazione di un modello di diffusione o di previsione della domanda che meglio si adatti al fenomeno trattato. Quindi si descrivono i principali modelli previsionali e di diffusione teorici esistenti in letteratura, enfatizzandone criticità, punti di debolezza o di forza emersi anche grazie all'analisi di articoli scientifici. Inoltre, nel secondo capitolo, si espone in modo prettamente teorico la metodologia individuata come quella migliore per gli scopi dell'elaborato, spiegandone i criteri che hanno portato alla sua selezione, questo per predisporre i concetti cardine alla base di tale metodologia, che diventerà il fulcro del seguente elaborato nei capitoli successivi.

Individuata la metodologia atta a modellare e simulare le dinamiche evolutive della diffusione della pandemia COVID-19, l'elaborato prosegue con la descrizione dei passi procedurali che hanno condotto alla costruzione della raccolta dati. Il dataset così creato presenta un totale di 18 403 dati, per 215 Paesi, nell'arco temporale 20/01/2020 - 31/05/2020. In questa seconda sezione, viene anche descritto ed elaborato l'andamento globale dei contagi emerso dall'osservazione del dataset stesso, per avere, fin dal principio, una panoramica generale della situazione nel mondo, fotografata al 31 maggio 2020.

Dunque è stato possibile procedere con la descrizione del modello creato e con la relativa calibrazione, per consentire l'adattamento ai diversi Paesi. Di conseguenza, è stata testata la bontà dei modelli creati, confrontando l'andamento ottenuto dai modelli SD con quello reale che si evince dal dataset stesso e ipotizzati tre scenari per nazione, per raffigurare differenti misure restrittive potenzialmente adottabili per il contenimento della pandemia. Infine, si sono

confrontati i risultati ottenuti, fornendone una discussione critica, per poi concludere esponendo le limitazioni del seguente lavoro di tesi ed indicandone anche benefici ed eventuali spunti di ricerca futura.

È stato fornito dunque un modello iniziale sul quale basarsi per poter osservare cosa comporterebbe l'adozione o meno di determinate misure restrittive, emerse fondamentali nella lotta contro la pandemia, ed aiutando così i governanti a prendere decisioni. A tal fine sono risultati fondamentali anche la relativa prontezza degli Stati all'emergenza sanitaria, il fattore socioculturale e la strategia comunicativa scelta dalle istituzioni.

# 1 La Pandemia COVID-19: il fenomeno e i modelli evolutivi

Nell'ambito di questo capitolo verrà affrontato il tema del *COVID-19*, descrivendo la malattia infettiva e definendone gli aspetti chiave alla base delle modalità di trasmissione. Descritto il fenomeno del COVID-19, il percorso di studio del seguente elaborato prevede ora un'indagine dei modelli di diffusione dell'innovazione e di previsione della domanda; tale ricerca verrà condotta al fine di individuare il modello che meglio si confaccia alla spiegazione della diffusione del COVID-19. Si è deciso di andare ad utilizzare modelli di natura gestionale, solitamente applicati in contesti molto diversi, con il fine di osservare se un'epidemia come quella che sta caratterizzando i giorni d'oggi, si diffonda nella società con dinamiche evolutive simili a quelle descritte dall'introduzione di una nuova innovazione sul mercato.

A tale scopo sono stati descritti i modelli teorici presi in considerazione ed evidenziate le rispettive peculiarità, anche mediante un'attenta analisi di articoli dalla letteratura. Inoltre, viene anche esposta la metodologia assunta, descrivendone gli aspetti chiave e spiegandone i criteri che hanno portato alla sua selezione.

## 1.1 Descrizione dell'epidemia COVID-19

Con il termine COVID-19 si fa riferimento alla malattia infettiva associata al virus SARS-CoV-2, un nuovo ceppo della famiglia dei coronavirus identificato per la prima volta nell'uomo a inizio dicembre 2019. La scoperta è avvenuta nella città di Wuhan, capoluogo con 11 milioni di abitanti della provincia di Hubei in Cina, dove sono apparsi celermente numeri significativi di casi di polmonite dall'origine sconosciuta. Solamente il 3 gennaio 2020 il *Chinese Center for Disease Control and Prevention* (China CDC) ha dichiarato responsabile di tali polmoniti un nuovo tipo di coronavirus a RNA, denominato inizialmente dalla *World Health Organization* (WHO) *Coronavirus 2019* (2019-nCoV) e successivamente SARS-CoV-2, definendo la malattia associata ad esso *Coronavirus disease 19* (COVID-19) [1]. Caratteristica importante di SARS-CoV-2, che sarà basilare anche al fine del presente elaborato, è, innanzitutto, la sua modalità di trasmissione, che avviene per via aerea tramite le goccioline respiratorie, le quali

possono infettare direttamente due o più soggetti a distanza ravvicinata (contatto diretto), oppure indirettamente cadendo su superfici e oggetti condivisi tra più individui (contatto indiretto). La modalità di trasmissione del virus ne rappresenta la principale peculiarità per questo lavoro di tesi; infatti, intervenendo con adeguate misure restrittive è possibile rallentare la diffusione del virus, argomento cardine dei capitoli successivi. In questo caso, vista la natura di SARS-CoV-2, sono state adottate misure preventive e di contenimento quali il mantenimento di una distanza interpersonale di almeno un metro, il lavaggio frequentemente delle mani e l'indossare la mascherina individuale. Inoltre, il periodo di incubazione di tale virus è in media di 5,2 giorni, con il 95° percentile di 12,5 giorni e per questo motivo è stato indicato un periodo di isolamento di 14 giorni dalla possibile esposizione a un caso sospetto o accertato; durante tale periodo si è contagiosi anche se i sintomi compaiono a posteriori [2]. Il COVID-19, una volta contratto, colpisce principalmente il tratto respiratorio inferiore provocando una serie di sintomi descritti come simil-influenzali tra cui febbre, tosse, respiro corto, dolore ai muscoli, stanchezza e disturbi gastrointestinali. Nei casi più gravi potrebbe verificarsi una polmonite, una sindrome da distress respiratorio acuto, sepsi, shock settico e una tempesta di citochine fino ad arrivare al decesso del paziente.

L'origine scaturente tale virus non è tuttora stata accertata, tuttavia si sono già riscontrati nella storia casi di coronavirus ritenuti provenienti da alcune specie animali. Si riporta come esempio il caso della *Sindrome Respiratoria del Medio Orientale* (MERS-CoV), trasmessa all'uomo dai cammelli, ma ancora più significativa per somiglianza delle caratteristiche, la *Sindrome Respiratoria Acuta Grave Coronavirus-1* (SARS-CoV-1), trasmessa dallo zibetto [3]. Pertanto, una delle ipotesi prese in considerazione in questo caso è stata quella di ritenere responsabili del contagio i pipistrelli, considerati ospiti naturali di tali virus. Inoltre, è proprio per la grande somiglianza riscontrata tra il ceppo SARS-CoV-1 e quello SARS-CoV-2 che quest'ultimo è stato rinominato, ma nonostante i due siano estremamente correlati e appartengano alla stessa famiglia, non sono identificabili nel medesimo ceppo. Infatti questi presentano numerose analogie quali i sintomi, il tempo di incubazione e le modalità di trasmissione ma al contempo anche divergenze delle caratteristiche epidemiologiche e biologiche che hanno reso il SARS-CoV-2 di più rapida trasmissione. Questo fattore rappresenta il motivo per il quale il SARS-CoV-2 risulta essere una minaccia così di gravosa da aver attirato l'attenzione mondiale, al punto che la *WHO* l'11 marzo 2020 ha dichiarato il COVID-19 un'emergenza pubblica di interesse internazionale (*PHEIC - Public Health emergency of International Concern*). In precedenza, in seguito al virus della SARS, sviluppatosi a Guangdong in Cina nel 2003, la *WHO* aveva dichiarato solamente 5 *PHEIC*:

- H1N1 (2009);
- Poliomielite (2014);
- Ebola nell'Africa occidentale (2014);
- Zika (2016);
- Ebola nella Repubblica Democratica del Congo (2019).

Dichiarare un'emergenza pubblica di interesse internazionale è un appello alla comunità mondiale che ha lo scopo di spingere tutti i Paesi ad attuare uno sforzo coordinato e globale per arrestare l'epidemia, richiedendo un impegno sanitario, politico ed economico non indifferente. Alla luce di ciò, si è ritenuto opportuno assumere nel seguente lavoro di tesi un punto di vista internazionale, andando ad osservarne la diffusione a livello globale.

## **1.2 Modelli di previsione della domanda presenti in letteratura**

Con il termine *modelli previsionali della domanda* si fa riferimento ad un insieme di metodi che, analizzando la domanda di un determinato prodotto, sono in grado di restituirne previsioni in un prefissato orizzonte temporale.

I modelli appartenenti a tale gruppo sono molteplici e, come si evince dalla *Figura 1*, sono stati suddivisi in tre categorie (Chambers *et al.*, 1971):

- Tecniche qualitative: non si basano su un approccio matematico formalizzato ma ricavano le previsioni da dati qualitativi quali opinioni di esperti e informazioni speciali, sono flessibili e possono tener conto di fattori difficilmente quantificabili. Tuttavia, presentano la grande debolezza di soffrire spesso dell'errore umano a sovrastimare o sottostimare sistematicamente la domanda.
- Metodi di analisi delle serie temporali: fanno riferimento esclusivamente all'andamento storico dei dati e alle relative variazioni per l'elaborazione delle previsioni. In questo tipo di modelli sono presenti esclusivamente due variabili rilevanti: le osservazioni di domanda ed il tempo. Pertanto, questi strumenti sono efficaci unicamente quando i cambiamenti della domanda dipendono dal tempo, e non funzionano propriamente quando altre variabili giocano un ruolo maggiore.
- Modelli causali: prendono in esame il rapporto tra un evento casuale e l'evento da prevedere, utilizzando informazioni molto raffinate e richiedendo notevole competenza, denaro e tempo.



**Figura 1:** Classificazione dei metodi previsionali [5]

### 1.2.1 Metodi basati sulle serie temporali

Nel seguente paragrafo l'attenzione sarà ristretta e rivolta ai modelli basati sull'analisi delle serie storiche, dal momento che lo scopo del seguente elaborato risiede nell'individuazione di un modello in grado di assumere come input i dati, raccolti come riportato nella *sezione 2.1*. Infatti, i metodi basati sulle serie temporali tentano di prevedere il futuro basandosi sull'osservazione dei dati passati, che a tal fine devono essere relativamente chiari e stabili. Analizzare le serie temporali risulta utile per riuscire ad individuare variazioni sistematiche nei dati dovute a stagionalità, andamenti ciclici eventuali e tassi di crescita delle tendenze. Tali metodi partono dal presupposto che il futuro sarà simile al passato, ossia che l'andamento del presente rimarrà pressoché invariato nel futuro; affermazione relativamente corretta nel breve termine ammesso che l'andamento della domanda appaia stabile. Diverse tecniche previsionali appartengono a tale categoria tra le quali: la media mobile, la media mobile ponderata, il metodo dello smorzamento esponenziale semplice, doppio e di Holt-Winters. Nello specifico nella *sezione 1.2.2* sarà messo a fuoco in modo prettamente teorico il metodo dello smorzamento esponenziale di Holt-Winters.

### 1.2.2 Il metodo dello smorzamento esponenziale di Holt-Winters

Il metodo di Holt-Winters è una generalizzazione dei metodi di lisciamento esponenziale (*exponential smoothing*) semplice e doppio, apportata per poter includere una componente stagionale all'equazione ricorsiva del modello (Winters, 1960). Con questa tecnica la nuova previsione viene stimata attribuendo maggior peso ai dati più recenti e minore peso, decrescente in modo esponenziale, ai termini precedenti della serie, a differenza delle medie mobili che assegnano uno stesso peso a ciascuna delle  $k$  osservazioni. Inoltre, per gestire

rispettivamente il livello della domanda, il trend e la stagionalità sono stati introdotti tre parametri compresi tra 0 e 1:

- $\alpha$  : la reattività del modello. Variando  $\alpha$  cambia il peso dato alle osservazioni. Più tale valore è alto e, quindi più vicino ad 1, più l'algoritmo diventa reattivo e aumenta la sensibilità al cambiamento ma, d'altra parte, filtra poco il rumore. In particolare, quando  $\alpha$  assume il valore di 1, lo smorzamento esponenziale è altamente influenzato da ogni cambiamento della domanda. Viceversa, con bassi valori di  $\alpha$  l'algoritmo attribuisce maggiore peso alle osservazioni passate, e per questo è più stabile, ma poco reattivo. La scelta di  $\alpha$  dovrebbe essere adattata dinamicamente ai cambiamenti della domanda, cioè bisognerebbe aumentarne il valore se la domanda sta andando verso periodi di cambiamento, e ridurne il valore quando ci si aspetta che la domanda sia stabile con variazioni casuali attorno il valore medio (Brandimarte e Zotteri, 2007);
- $\beta$  : il secondo fattore di smorzamento, adimensionato, usato per aggiornare il parametro relativo al trend;
- $\gamma$  : il parametro rappresentante la stagionalità. Per stimarlo è necessario innanzitutto individuare la stagionalità della serie, ossia la durata della stagione che si vuole analizzare ed il numero di time bucket in cui si vuole suddividerla. Fatto ciò, dovranno essere definiti indici di stagionalità differenti, per ogni periodo e sarà dunque necessario determinare un fattore che indichi quanto questo periodo si discosti dalla media.

Invece le variabili prese in considerazione dal modello sono:

- $L_t$  che rappresenta il livello della domanda nel periodo  $t$ ;
- $T_t$  il trend della domanda nel periodo  $t$ . Se  $T_t$  è positivo allora la domanda sta crescendo, viceversa la domanda sta diminuendo nel tempo;
- $S_t$  stagionalità della domanda nel periodo  $t$ .

Il metodo Holt-Winters, come sopra riportato, rappresenta una generalizzazione dei metodi di smorzamento esponenziale semplice e doppio, infatti andando a porre  $S_t = 0$  otteniamo il metodo di smorzamento esponenziale doppio e, assumendo  $T_t = S_t = 0$  ritroviamo il modello di smorzamento esponenziale semplice.

Di seguito sono riportati il metodo stagionale additivo e il metodo stagionale moltiplicativo.



## METODO STAGIONALE ADDITIVO

Il metodo di Holt-Winters stagionale additivo si basa sull'ipotesi che nelle vicinanze di  $t$  la serie storica sia esprimibile dall'equazione 1.1:

$$P_{t+h} = L_t + hT_t + C \quad (1.1)$$

Dove  $h$ ,  $L_t$ ,  $T_t$  e  $P_{t+h}$  rappresentano l'orizzonte di previsione, il livello della domanda, il trend stimato al tempo  $t$  e la previsione futura della domanda.

Per fare previsioni dobbiamo stimare  $L_t$ ,  $T_t$  e  $S_t$ , attraverso le equazioni ricorsive 1.2, 1.3 e 2.4:

$$L_t = \alpha(Y_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (1.2)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta) T_{t-1} \quad (1.3)$$

$$S_t = \gamma(Y_t - L_t) + (1 - \gamma)S_{t-s} \quad (1.4)$$

Il fattore di trend viene aggiornato in modo del tutto analogo a quello dello smorzamento esponenziale doppio (equazione 1.3), mentre l'equazione 1.4 aggiorna il fattore di stagionalità comparando l'ultima osservazione di domanda con l'ultima stima della domanda media.

La differenza tra queste due variabili rappresenta quanto la domanda sia stata sopra o sotto la media mensile durante l'ultimo periodo. Dunque, questa differenza è utilizzata per aggiornare il fattore di stagionalità di quel determinato mese.

## METODO STAGIONALE MOLTIPLICATIVO

Il metodo stagionale moltiplicativo in prossimità di  $t$  la serie storica è data dalla relazione 1.5:

$$P_{t+h} = (L_t + hT_t)S_{t+h-s} \quad (1.5)$$

Dove  $S_{t+h-s}$  rappresenta l'indice di stagionalità relativo al periodo  $t+h$  sul quale si effettua la previsione. Di conseguenza le equazioni ricorsive 1.6, 1.7 e 1.8 vengono applicate per stimare i vari parametri:

$$L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (1.6)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta) T_{t-1} \quad (1.7)$$

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_t} + (1 - \gamma)(S_{t-s}) \quad (1.8)$$

Differisce dal metodo visto sopra poiché essendo la stagionalità moltiplicativa e non più additiva nella formula relativa all'aggiornamento del livello di domanda è presente un rapporto tra i parametri  $\frac{Y_t}{S_{t-s}}$ , piuttosto che la loro differenza, così come nell'ultima equazione, dove viene aggiornato l'indice di stagionalità (Kalekar, 2004).

Il metodo di Holt Winters, sia esso additivo o moltiplicativo, è anch'esso un metodo di previsione ricorsivo, e pertanto necessita di essere inizializzato.

Più dati si avrà a disposizione, più l'inizializzazione sarà accurata, ma il numero minimo di dati necessari è  $s+1$ , poiché bisogna considerare il valore iniziale di  $s+2$  parametri aventi il vincolo che la media di tutti gli indici di stagionalità deve essere pari a 1. In generale vengono utilizzati almeno  $2s$  osservazioni di domanda per inizializzare i parametri del modello, ossia due stagionalità intere (Brandimarte e Zotteri, 2007).

L'inizializzazione del fattore  $T_{t=0}$  si esplicita mediante la relazione 1.9:

$$T_{t=0} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \frac{Y_{s+i} - Y_i}{s} \quad (1.9)$$

Sono così stimate  $s$  differenze tra coppie di domanda che condividono lo stesso indice di stagionalità. La media di queste differenze è una stima del parametro iniziale  $T_{t=0}$ , che non risulta affetto da stagionalità.

Calcolato  $T_{t=0}$ , è possibile ricavare l'equazione 1.10 per l'inizializzazione del livello di domanda  $L_{t=0}$ :

$$L_{t=0} = \sum_{i=1}^l \frac{Y_i - iT_0}{l} \quad (1.10)$$

Andando a sottrarre  $iT_0$  dall'osservazione di domanda, si fa in modo che le osservazioni di domanda appartenenti a differenti time bucket siano comparabili tra loro. Pertanto, la media, così come per il metodo dello smorzamento esponenziale doppio, rappresenta la stima iniziale del livello di domanda  $L_{t=0}$ . Per ultima cosa, per il calcolo degli indici di stagionalità (equazione 1.11) si confronta l'osservazione reale  $Y_t$  con quella che si sarebbe osservata se non ci fosse stata la stagionalità, cioè  $L_{t=0} + tT_t$ .

$$S_{j,s} = \frac{\sum_{k=0}^{\frac{l}{s}-1} \frac{Y_{j+ks}}{L_0 + (j + ks)T_0}}{\frac{l}{s} - 1} \quad (1.11)$$

I vantaggi ed i limiti di tale modello sono del tutto analoghi a quelli dello smorzamento esponenziale doppio, nonostante questo metodo sia più flessibile date le sue due varianti. Tuttavia, l'inizializzazione dei numerosi fattori e la scelta dei parametri  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , determinanti la reattività del modello, devono essere svolte con attenzione ed influenzano le previsioni generate (Brandimarte e Zotteri, 2007).

### *1.2.3 Il metodo di Holt-Winters: considerazioni*

Descritta la teoria alla base del seguente modello, si passa ad analizzarne le criticità e i limiti di applicabilità, con il supporto della letteratura.

Il metodo del livellamento esponenziale viene proposto e utilizzato per effettuare previsioni a breve termine di prodotti con ciclo di vita ristretto e dove l'informazione delle tendenze più recenti del mercato risulta essere evidentemente la più rilevante. Inoltre, la sua applicazione è particolarmente consigliata nel caso di scarsa disponibilità di dati storici, rimanendo tuttavia un accurato strumento previsionale. Per questo motivo nella pubblicazione *Online forecasting of Covid-19 cases in Nigeria using limited data* (Kabir Abdulmajeeda *et al*, 2020) è stato selezionato come metodo di previsione della diffusione della pandemia.

Tuttavia, la debolezza di questo lavoro risiede nell'aver applicato un metodo non in grado di fornire previsioni affidabili se utilizzato singolarmente e dovendolo pertanto integrare con ulteriori modelli previsionali per compensarne le carenze. In aggiunta le previsioni effettuate risultano ritardate.

Si evince dunque che il metodo in esame non sia idoneo al seguente studio in quanto in primis si dispone di un dataset imponente ed in secundis si sta conducendo un'indagine che sia in grado di individuare un unico modello, la cui applicazione sia sufficiente a descrivere la diffusione del virus a livello internazionale.

## **1.3 Modelli di diffusione dell'innovazione presenti in letteratura**

Un modello di diffusione è un insieme di equazioni matematiche usate per illustrare come l'innovazione si diffonda nella società. Tali modelli tengono in considerazione i fenomeni che nel tempo possono influenzare il processo diffusionale tramite l'utilizzo di variabili esplicative e di parametri. In letteratura i modelli di diffusione vengono utilizzati principalmente per descrivere la diffusione di un prodotto sul mercato e si distinguono in modelli omogenei ed eterogenei. I modelli omogenei si basano sulla teoria del flusso a due fasi di comunicazione (Lazarsfeld *et al.*, 1944), che vede un'innovazione diffondersi inizialmente tramite i mass media

tra pochi individui, per poi raggiungere i rimanenti con il passaparola (o WOM-Word Of Mouth). I modelli eterogenei invece si basano sulla probabilità di adozione e utilità, tenendo inoltre conto della differenza tra gli individui, che li porta all'adozione di un'innovazione in tempi differenti. Nel seguente paragrafo, partendo dalle prime teorie degli inizi del '900 e passando attraverso la teoria di Everett Rogers, si andranno ad illustrare a livello teorico i principali modelli di diffusione omogenei presenti nella letteratura, esponendone infine le relative considerazioni elaborate.

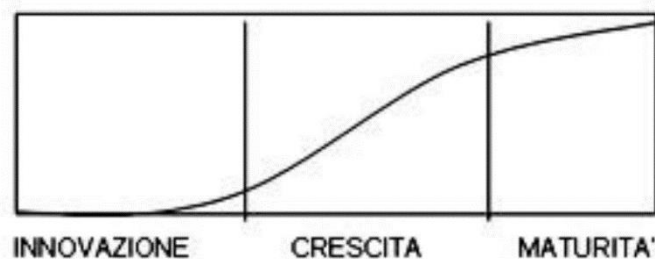
### *1.3.1 La curva ad S di Tarde e la teoria della diffusione di Everett Rogers*

La curva ad S di Tarde e la teoria della diffusione di Everett Rogers vengono riportati nel seguente elaborato a scopo puramente introduttivo, in quanto tramite la loro esposizione sarà più agevole la comprensione dei modelli di diffusione esposti nei paragrafi successivi.

#### LA CURVA AD S DI TARDE

Il primo a studiare i processi di diffusione dell'innovazione fu il francese G. Tarde (1903), il quale comprese come la diffusione di prodotti e servizi seguisse una curva ad S suddivisibile in tre fasi:

- Innovazione: descritta da una diffusione iniziale molto lenta;
- Crescita: fase in cui la velocità di diffusione aumenta e cresce rapidamente;
- Maturità: dove il mercato si satura e la diffusione rallenta.



*Figura 2: Rappresentazione della curva ad S di G. Tarde*

In *Figura 2* è possibile osservare la tipica forma della curva ad S, ottenuta ponendo sull'asse delle ordinate il numero di adottatori di un nuovo prodotto o servizio e sull'asse delle ascisse il tempo.

In seguito, ad arricchire lo studio intrapreso da G. Tarde si aggiunse un'ulteriore categorizzazione redatta da B. Ryan e N. Gross (1943). Questi studiosi suddivisero gli individui in cinque categorie in base al loro comportamento nei confronti dell'innovazione:

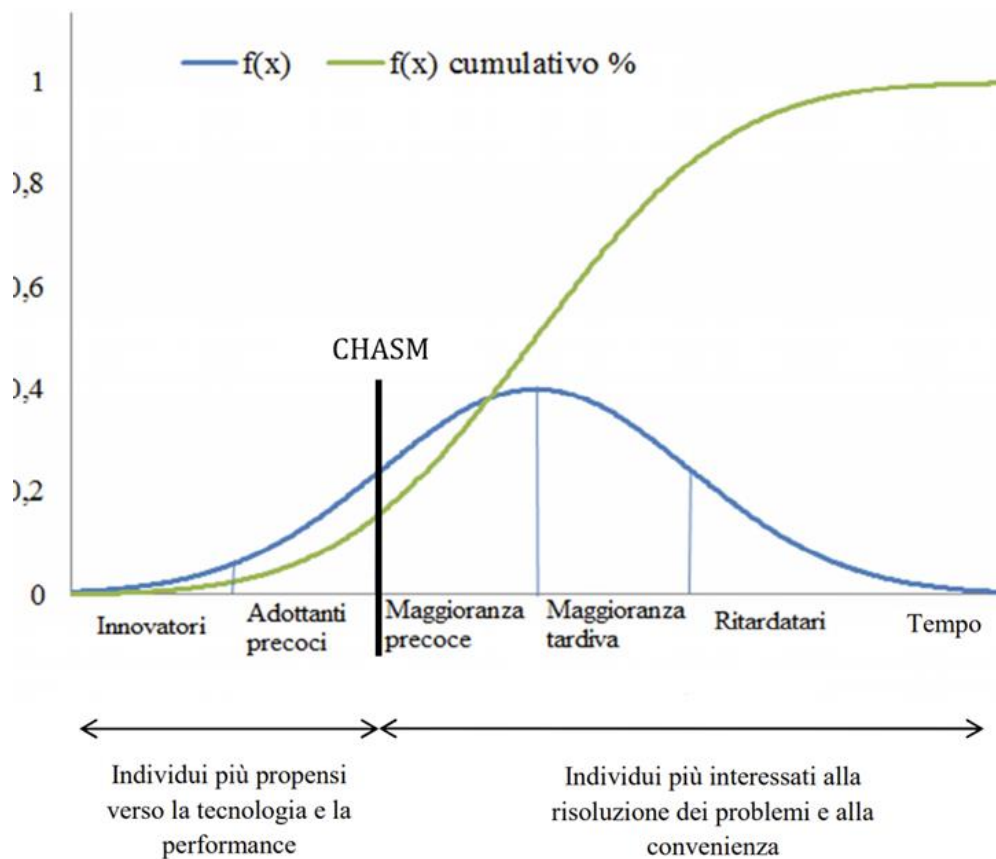
- *Innovators* (innovatori);

- *Early adopters* (anticipatori);
- *Early majority* (la maggioranza anticipatrice);
- *Late majority* (la maggioranza ritardataria);
- *Laggards* (ritardatari).

Tale suddivisione costituisce il punto di partenza della teoria sviluppata da Everett Rogers.

### TEORIA DELLA DIFFUSIONE DI EVERETT ROGERS

Il principale autore di riferimento in questo settore è Everett Rogers, che negli anni '60, partendo dalla categorizzazione di Ryan e Gross, identifica per ogni gruppo delle caratteristiche distintive. Iniziando a vedere il processo di diffusione come qualcosa di natura comunicativa, in cui intervengono le caratteristiche personali. Rogers propone, dunque, non più una curva ad S, ma una curva a campana, come raffigurato nella *Figura 3*.



**Figura 3:** Curva a campana della diffusione di un'innovazione secondo E. Rogers, con la soglia critica di Moore [6]

Inoltre identifica per ogni categoria determinate caratteristiche:

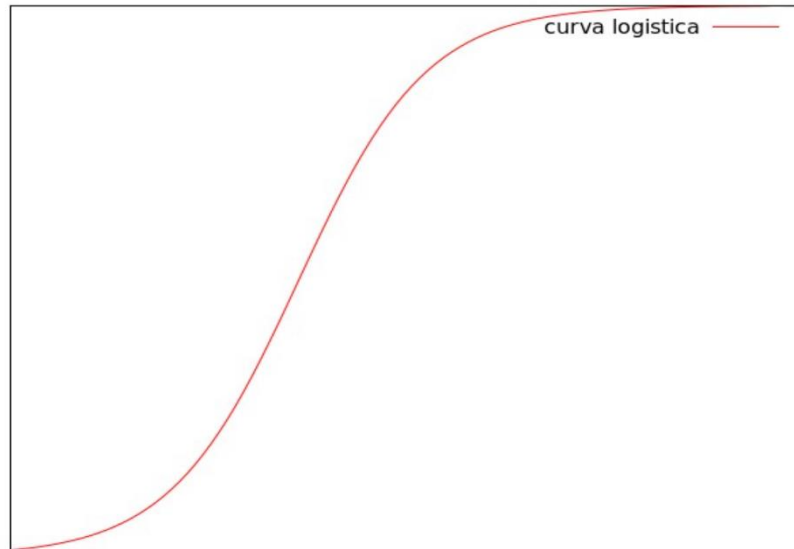
- il gruppo A raffigura gli *innovators*, caratterizzati da elevata istruzione, orientati al rischio e esposti a più fonti di informazione;

- il gruppo B, quello degli *early adopters*, hanno anch'essi elevata istruzione e reputazione nella comunità, capacità di leadership e esperienze di successo;
- il gruppo C è quello degli *early majority*, caratterizzati da grande interazione con i pari. Spesso hanno ruoli di leadership e tendono ad adottare una nuova idea dopo un processo deliberativo;
- il gruppo D include la *late majority*. Gli individui di questa categoria sono scettici, prudenti, tradizionalisti e con un livello economico basso.
- L'ultimo gruppo, E, rappresenta i *laggards*. Questi ultimi sono di norma persone isolate, sospettose e con poche relazioni sociali. Sono dotati di poche risorse e hanno un processo di *decision making* lento.

Negli anni '90 G. Moore muove alcune modifiche alla teoria di Rogers, criticandone la visione di adozione della tecnologia come un processo continuo e soprattutto inserisce un'interruzione tra gli *early adopters* e gli *early majority*. Questa interruzione viene chiamata *chasm* e costituisce il vero punto di svolta nella diffusione di una tecnologia, infatti una volta oltrepassata questa soglia (*crossing the chasm*) la tecnologia si diffonderà raggiungendo la maggioranza degli individui (*Figura 3*).

### 1.3.2 La curva logistica

Fornite le informazioni alla base della teoria della diffusione di un prodotto o di un servizio, lo studio procede con la descrizione dei principali modelli primo tra i quali la curva logistica. Dalla *Figura 4* si può osservare come la curva descritta sia una curva ad S, formata da due rami: il primo esponenziale, in cui si assiste alla rapida crescita della diffusione, e il secondo logaritmico dove si registra un rallentamento in prossimità del valore massimo permesso, che costituisce un limite asintotico della funzione; i due rami si uniscono in corrispondenza del punto di flesso. Tale curva è stata largamente utilizzata per descrivere la crescita di popolazioni ma viene quotidianamente applicata anche per illustrare il progresso della diffusione di un'innovazione nel suo ciclo di vita.



**Figura 4:** Esempio di curva logistica [7]

L'equazione differenziale che descrive la curva di crescita logistica è la 1.12:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\alpha}{M} n(t)[M - n(t)] \quad (1.12)$$

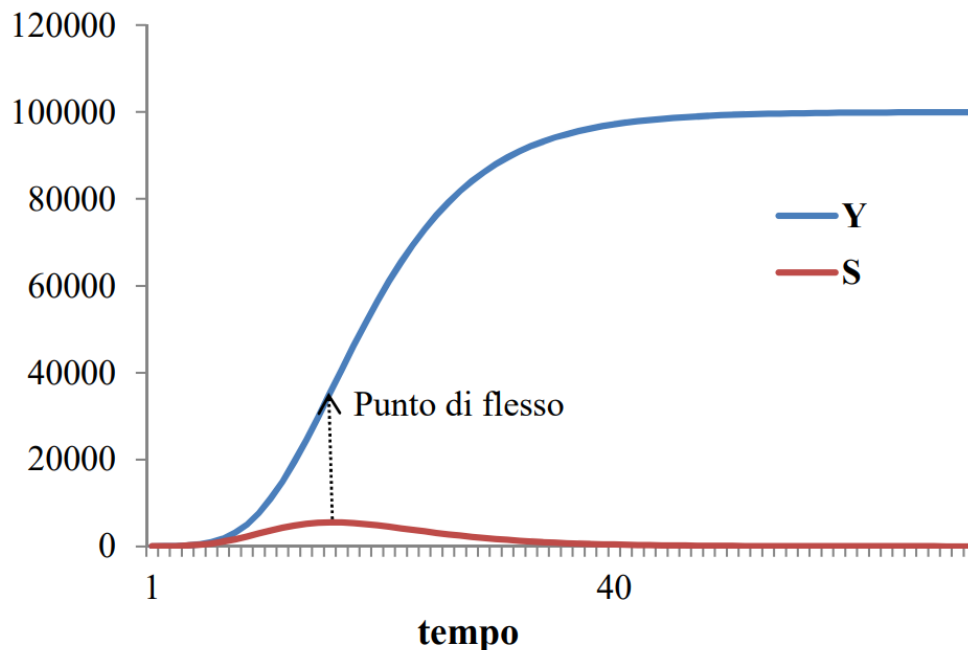
Dove  $\alpha$  rappresenta il coefficiente di adozione per imitazione,  $M$  il valore massimo raggiungibile e  $n(t)$  la previsione del numero di adottatori al tempo  $t$ .

Possiamo dunque affermare che la curva logistica rappresenta la diffusione imitativa, detta anche epidemica, in cui il tasso di diffusione è unicamente funzione dell'interazione sociale tra chi ha già adottato il bene e i potenziali acquirenti. Infatti le curve epidemiologiche classiche seguono tipicamente una curva *logistica*, che cresce in modo esponenziale fino al raggiungimento del punto di flesso, in corrispondenza del quale rallenta per poi giungere alla saturazione. Saturazione raggiunta quando la popolazione contagiata diventa sovrapponibile alla popolazione totale o, in uno scenario migliore, vengono adottate misure restrittive adeguate a contenere la diffusione. Questa dinamica di evoluzione epidemiologica, infatti, la si riscontra anche nei grafici riportati nella sezione 2.2, che raffigurano l'andamento della diffusione del COVID-19 nei diversi Paesi del mondo.

### 1.3.3 Il modello di Gompertz

Collegata al modello logistico è la curva di Gompertz, sviluppata dal matematico inglese B. Gompertz nel 1825. Inizialmente era stata pensata come modello demografico di sopravvivenza in studi sulla crescita delle popolazioni animali ma in letteratura è ormai

largamente utilizzata per la previsione nel mercato dei beni durevoli. In campo economico ne ha fatto uso per la prima volta Hendry (1972).



**Figura 5** Esempio di curva di adozione istantanea e cumulativa nel modello di Gompertz. [8]

La curva del modello di Gompertz, rappresentata nella *Figura 5*, inizialmente subisce un incremento a tasso crescente, seguito da uno decrescente; anche in questo caso si è alla presenza di un punto di flesso, che rappresenta la parte della curva in cui il coefficiente angolare non si incrementa né decrementa. La funzione di Gompertz infatti produce, da un punto di vista diagrammatico, anch'essa una curva ad S distesa come nel modello logistico dal quale si distacca per la mancanza di simmetria attorno al punto di flesso. Appare infatti più flessibile della curva logistica, in quanto asimmetrica. Il modello di Gompertz ha due limiti asintotici: uno inferiore dove il braccio della curva tende a zero senza mai raggiungerlo e uno superiore che tende al valore costante  $K$ , *potenziale di mercato*. L'equazione differenziale 1.13 utilizzata per descrivere la funzione di Gompertz è:

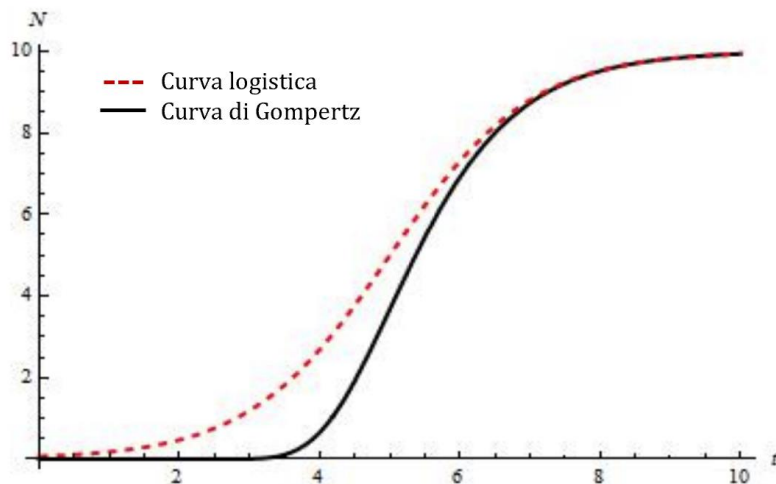
$$\frac{dN}{dt} = -rN \ln\left(\frac{N}{K}\right) \quad (1.13)$$

Dove  $N$  rappresenta la popolazione e  $r$  il tasso di crescita. Per costruire matematicamente il modello di Gompertz l'analista deve essere in grado di stimare il valore di  $r$  e del parametro  $K$ , che nel nostro caso di studio sarebbe identificato con il numero massimo di contagi possibili, ossia il totale della popolazione.



#### 1.3.4 La curva logistica e il modello di Gompertz: considerazioni

Nonostante le due curve siano piuttosto simili nel comportamento e nella struttura, la curva di Gompertz si distingue da quella logistica, in aggiunta a quanto riportato al paragrafo 1.3.3, anche per il suo più lento raggiungimento della saturazione. Infatti, come si può notare dalla *Figura 6*, la funzione di Gompertz esibisce un tasso di accrescimento che diminuisce esponenzialmente fin dal principio.



**Figura 6:** Grafico di confronto tra curva logistica e quella di Gompertz [8]

Tale peculiarità lo rende idoneo a prevedere la diffusione dei tumori in modo da riuscire a pianificare la logistica del trattamento e stimare i tempi di sopravvivenza dei pazienti, come descritto nell'articolo *Stochastic growth pattern of untreated human glioblastomas predicts the survival time for patientstale* (Ziwei Ma *et al*, 2020). L'utilizzo del modello di Gompertz per l'analisi della crescita tumorale è stato largamente trattato in letteratura in quanto si è dimostrato come le cellule tumorali rallentino la propria espansione all'aumentare della dimensione della loro massa.

Nonostante le differenze evidenziate tra i due modelli, entrambi vengono ampiamente applicati in letteratura per la descrizione dell'andamento epidemico, nei termini descritti nella sezione 1.2.2. Tuttavia dall'analisi della letteratura stessa è emersa la seguente criticità: sia la curva logistica che il modello di Gompertz (sezioni 1.2.2 e 1.2.3) assumono nelle rispettive equazioni (1.12 e 1.13) un unico parametro di diffusione, l'adozione per imitazione. Pertanto sono modelli atti a descrivere prodotti il cui uso generi vantaggi tangibili e facilmente comunicabili attraverso il passaparola (*WOM*). Si evince dunque che nei modelli considerati non venga tenuto conto della possibilità che il tasso di crescita dell'adozione dipenda, oltre che dalla rete interpersonale, anche da fattori esterni. Tale

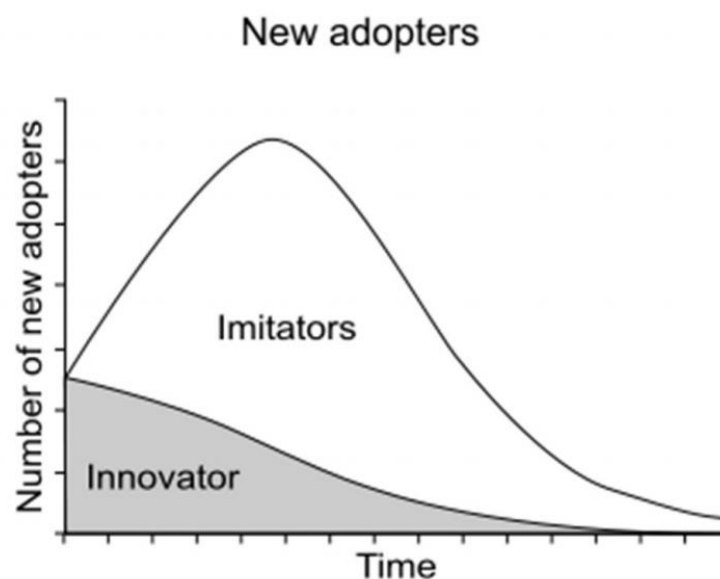
precisazione potrebbe apparire superflua in diversi casi di studio ma nell'analisi di diffusione di una malattia infettiva con le modalità di trasmissione riportate al paragrafo 1.1, risulta particolarmente rilevante. Infatti, oltre ad un parametro che consideri la frequenza dei contatti tra i membri di una società, è necessario anche un coefficiente capace di rappresentare il valore dell'infettività del virus stesso. Motivo per cui si è ritenuto opportuno escludere l'applicazione sia della curva logistica che del modello di Gompertz.

### 1.3.5 Il modello di Bass

Nel 1969 Frank Bass, tentando di superare il limite esposto al paragrafo 1.3.4, intrinseco sia alla curva logistica che a quella di Gompertz, elaborò un nuovo modello di diffusione, denominato *Bass Diffusion Model* (Bass, 1969).

Il modello di Bass rappresenta una generalizzazione dell'equazione logistica e si basa sul concetto di diffusione dell'informazione sia interna che esterna al mercato: l'informazione esterna è identificata con la pubblicità tradizionale, mentre l'informazione interna è quella fondata sul passaparola dei clienti. Dalla *Figura 7* è possibile notare come Bass distingua dunque gli individui in due gruppi:

- Innovatori: coloro che adottano per primi un nuovo prodotto o servizio tramite influenze esterne, innovatività e comunicazione diffusa dai produttori stessi;
- Imitatori: persone che adottano per meccanismi interni al mercato come il passaparola e le esternalità di rete.



*Figura 7 : Curva di diffusione di un'innovazione secondo Bass [9]*

Inoltre, riprendendo le tesi di Rogers, Bass identifica tre fattori:

- Le potenzialità del mercato  $M$ : il numero massimo possibile di adottanti la nuova innovazione;
- Il coefficiente di innovazione  $p$ : influenze esterne e pubblicità;
- Il coefficiente di imitazione  $q$ : influenze interne che portano all'adozione per imitazione, come passaparola (WOM).

Questi tre fattori vengono considerati costanti nel tempo e fanno parte dell'equazione differenziale di primo grado 1.14:

$$n(t) = \frac{dN(t)}{dt} = p[M - N(t)] + q \frac{N(t)}{M} [M - N(t)] \quad (1.14)$$

Viene riportata in aggiunta l'equazione 1.15, soluzione dell'equazione differenziale, che indica il numero di adottatori in un certo istante di tempo  $t$ :

$$N(t) = M \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (1.15)$$

Il primo termine dell'equazione 1.14 si riferisce alla parte di adozioni innovative, dipendenti dal parametro  $p$ , mentre il secondo termine rappresenta le adozioni imitative, dipendenti dal parametro  $q$ . Le adozioni secondo il modello di Bass possono assumere andamenti differenti se i coefficienti di innovazione e di imitazione prevedono valore zero, infatti:

- Se il coefficiente di innovazione  $p$  viene assunto nullo, significa che la pubblicità tradizionale è assente e perciò si ricade nell'equazione della curva logistica.
- Se invece il coefficiente di imitazione  $q$  risulta uguale a zero, significa che il passaparola è nullo, ottenendo una distribuzione esponenziale.

Inoltre il modello esposto presenta alla base forti assunzioni quali: la presenza di un mercato monopolistico, un processo di azione binario e la non considerazione di variabili come il marketing. Per questo motivo negli anni successivi sono state apportate in letteratura numerose modifiche ed estensioni.

### 1.3.6 Il modello di Bass: considerazioni

Messa a fuoco la teoria alla base del modello di Bass risulta ora possibile trarre alcune considerazioni. Innanzitutto dal paragrafo 1.3.5 si nota come, grazie all'introduzione dei coefficienti di innovazione  $p$  e di imitazione  $q$ , si sia superato il limite proprio del modello di Gompertz e della curva logistica, esposto nella sezione 1.3.4. Infatti, nell'equazione 1.14

del modello, oltre ad un parametro  $q$  che consideri la frequenza dei contatti tra i membri di una società, compare anche un coefficiente  $p$ , capace di rappresentare il valore dell'infettività del virus stesso. Da questo punto di vista, il modello di Bass risulta quindi essere idoneo a rappresentare il processo di diffusione descritto dal virus SARS-CoV-2.

Inoltre, dall'analisi della letteratura, emerge che nello studio delle epidemie i modelli di diffusione dell'innovazione siano i più simili al modello SEIR ed anche i più utilizzati. Con il termine *modello* Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered (*SEIR*) si fa riferimento al modello matematico più popolarmente applicato in epidemiologia, che considera gli individui contagiati, una volta guariti, immuni rispetto alla malattia contratta. Recentemente la possibilità di una seconda positività al COVID-19 è stata dichiarata non nulla, tuttavia i casi di reinfezione sono stati considerati molto rari e documentati in pazienti nei quali non sempre, dopo il primo contatto con il virus, erano presenti anticorpi [10]. Per tale motivazione, si è ritenuto possibile trascurare la reinfezione e definire il modello SEIR adeguato anche per il caso in esame. Nello specifico come riportato dall'articolo *Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models* (Rahmandad and Sterman, 2008) il modello di Bass in particolare risulta essere il più affine al modello SEIR tra i modelli di diffusione dell'innovazione.

Un'ulteriore conferma dell'idoneità del modello di Bass ad analizzare la diffusione di COVID-19 al seguente elaborato viene fornita dalla pubblicazione *Understanding Epidemics Using VensimPLE* (Sterman, 2007) in cui il modello in esame viene applicato per prevedere l'evoluzione nel tempo della malattia infettiva SARS, molto simile al COVID-19, come riportato al paragrafo 1.1.

Il modello di Bass si dimostra effettivamente in grado di catturare la dinamica evolutiva dell'epidemia SARS, producendo previsione accurate; pertanto si è ritenuto opportuno procedere con l'applicazione di tale modello per prevedere la diffusione del COVID-19, obiettivo del presente elaborato.

## 1.4 System Dynamics

Identificato il modello di diffusione atto a rispecchiare le dinamiche evolutive della pandemia COVID-19, il seguente studio prosegue con l'individuazione della metodologia utilizzata: *System Dynamics* (SD). Successivamente verrà presentata la letteratura alla base di tale scelta e descritte la storia e le principali caratteristiche della metodologia.

Con il termine *System Dynamics* si fa riferimento ad un approccio fondato sulla modellizzazione e simulazione tramite software volto a studiare il comportamento dei sistemi complessi dinamici. La sua prospettiva di analisi è orientata alla identificazione, studio e comprensione dei circuiti di retroazione (*feedback loops*) tra le differenti variabili che caratterizzano i sistemi aziendali indagati. Così la ricostruzione formale della struttura causale di un determinato sistema viene coniugata in un unico approccio alla riproduzione del comportamento dinamico della struttura stessa, generato attraverso la simulazione su computer (Davidsen 2000).

### *1.4.1 La scelta della metodologia System Dynamics: giustificazione attraverso la letteratura*

Nonostante le prime applicazioni dell'approccio System Dynamics siano state essenzialmente legate ad ambienti industriali, per la risoluzione di problemi tipicamente connessi alla corretta gestione dei flussi e degli stock di approvvigionamento, gli ambiti di utilizzo e di intervento dei modelli di simulazione risultano oggi decisamente ampi, rinvenendone numerose applicazioni anche in epidemiologia. A tal proposito si cita la pubblicazione *How simulation modelling can help reduce the impact of COVID-19* (Currie *et al*, 2020) in cui gli autori discutono e confrontano varie metodologie di modellazione e simulazione in merito al fenomeno del COVID-19. Lo scopo del lavoro è fornire ai governi nazionali la migliore metodologia applicabile in differenti decisioni ipotizzate scaturite dalla pandemia, per aiutarli nella previsione e dunque nell'attuazione delle migliori strategie per il contenimento del virus. Risultano visibili dalla *Figura 8* le diverse metodologie individuate dagli autori, applicabili ai rispettivi scenari ipotizzati, quali: System Dynamics (SD), Modellazione basata su agenti (ABM), Discrete event simulation (DES) e Simulazione ibrida (HS). Sempre dall'osservazione della *Figura 8*, si può notare come ogni decisione ipotizzata sia stata contrassegnata da un numero e cerchiata con i colori assegnati alle metodologie adeguate a descriverla; pertanto risalta immediatamente come System Dynamics, raffigurato con il colore azzurro, sia stato indicato in ognuna delle possibili

condizioni ipotizzate, giungendo dunque alla conclusione che rappresenti la metodologia più idonea, adatta per lo studio dell'andamento delle malattie infettive, come il COVID-19.



**Figura 8** Riepilogo delle decisioni chiave e delle rispettive tecniche di modellazione da utilizzare (Currie et al, 2020)

Inoltre, dall'analisi dell'articolo citato al paragrafo 1.2.6, *Understanding Epidemics Using VensimPLE* (Sterman, 2007) si evince un'aggiuntiva validazione dell'utilizzo di System Dynamics in campo epidemiologico; Sterman, oltre a confermare l'applicabilità di tale metodologia, la associa al modello di diffusione di Bass, simulando le dinamiche dell'andamento epidemiologico della SARS attraverso gli strumenti di SD.

#### 1.4.2 Storia

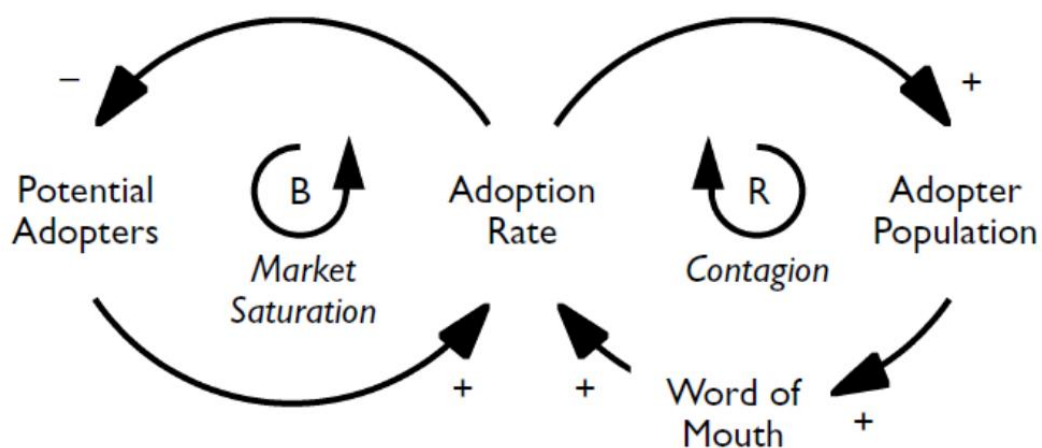
Il campo della dinamica dei sistemi fu sviluppato nella metà degli anni '50 da Jay Forrester, ingegnere elettrotecnico ed informatico e Professore al Massachusetts Institute of Technology, (MIT). Dopo aver accettato una cattedra alla MIT School of Management nel 1956, Forrester cominciò a chiedersi come la sua formazione ingegneristica potesse essere utilizzata per aiutare a comprendere i fattori determinanti il successo o il fallimento delle aziende. Le prime intuizioni arrivarono a seguito di un incontro con i dirigenti della General Electric, preoccupati per i cicli di occupazione dei loro stabilimenti. Dopo alcune simulazioni manuali della struttura di retroazione livelli-flussi di questi impianti, Forrester

fu in grado di dimostrare come questa instabilità nell'occupazione fosse causata dalla struttura interna aziendale e non dai cicli economici esterni. Dopo alcune simulazioni, insieme ad un team di studenti, riesce a trasformare i calcoli manuali in modellazioni al computer, dando origine a System Dynamics come disciplina. Nel 1961 Forrester pubblicò il primo libro sull'argomento intitolato *Industrial Dynamics*, mentre nel 1968 una collaborazione tra Forrester e l'ex sindaco di Boston John Collins portò ad un ampliamento dell'applicazione di System Dynamics con la pubblicazione di *Urban Dynamics*. Negli anni successivi SD proseguì la sua evoluzione aumentando i campi di applicazione e nel Forrester creò il modello che prevedeva la simulazione del sistema socioeconomico mondiale WORLD1, da cui poi derivò il WORLD2, pubblicato nel 1971 nel libro *World Dynamics*. Solo recentemente SD ha trovato un'accurata organizzazione grazie a J. D. Sterman, anch'esso Professore al MIT, con l'illustre libro *Business dynamics: system thinking and modeling for a complex world*, pubblicato nell'anno 2000.

#### 1.4.3 Descrizione della metodologia

System Dynamics mette a disposizione dell'analista un insieme completo di strumenti per consentire la ricostruzione della complessità di un sistema dinamico, tra i quali i principali sono: i *Casual Loop Diagrams* e gli *Stocks and Flow Diagrams*.

I *Casual Loop Diagrams* (CDL) costituiscono le mappe grafiche dei vari cicli di feedback all'interno di un sistema e servono per raffigurare in maniera semplice ed immediata la struttura causale del sistema di riferimento.

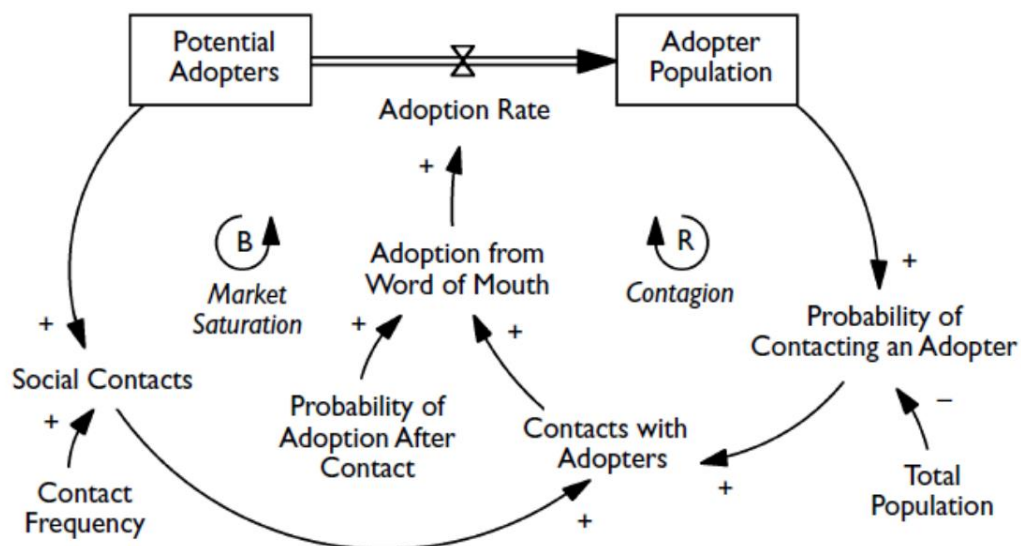


**Figura 9** Casual Loop Diagrams che mostra l'introduzione di un nuovo prodotto in un mercato. [11]

Sono disponibili due diverse tipologie di *Casual Loop Diagrams*:

- i circuiti positivi (o self-reinforcing), contraddistinti dalla lettera **R**, che operano rinforzando le tendenze e le dinamiche in atto all'interno di un determinato sistema e possono originare unicamente una crescita (o decrescita) di tipo esponenziale;
- i loop negativi (o self-correcting), rappresentati dalla lettera **B**, che si oppongono alla crescita e hanno un effetto di bilanciamento e allineamento verso un equilibrio statico.

Nella *Figura 9* è rappresentato un CLD a scopo puramente esemplificativo in cui si raffigura la dinamica dell'introduzione di un nuovo prodotto in un mercato: se il prodotto risulta attrattivo, gli *early adopter* con un passaparola positivo, attrarranno nuovi consumatori e la base di possessori del prodotto aumenterà ma al contempo l'aumentare degli *adopter* ridurrà la popolazione dei *potential adopter*, riflettendosi in una riduzione del tasso di adozione dovuta alla saturazione del mercato. Un sistema può essere rappresentato da molteplici loop che con la loro rete di interazione descrivono la struttura fisica del sistema reale analizzato. Tuttavia, il CLD è solo il primo passo per la creazione di un processo simulativo; il secondo step punta, infatti, ad aumentarne la precisione ed eseguire un'analisi quantitativa più dettagliata attraverso gli stock ed i flussi. Questi strumenti costituiscono il cuore dell'analisi dinamica poiché i primi rappresentano lo stato del sistema ed identificano le risorse chiave da gestire e sulle quali agire, mentre i secondi costituiscono l'unica modalità con la quale è possibile intervenire e modificare gli stock.



*Figura 10: Esempio di Stocks and Flows Diagram [11]*

Nella *Figura 10* è possibile notare come gli stock siano rappresentati da rettangoli e indichino il livello di utilizzatori e di potenziali nuovi clienti, mentre il flusso sia raffigurato



con una “conduttura” ed esprima il tasso di adozione che determina la velocità di variazione degli stock.

Inoltre SD fornisce ulteriori elementi aggiunti atti a migliorare il modello, nell'esempio riportato compaiono la probabilità di entrare in contatto con un utilizzatore, che dipende dal totale della popolazione e la probabilità di comprare il prodotto dopo aver incontrato qualcuno che già lo utilizza.

Questi due macro-elementi appena trattati, in una successiva fase, vengono espressi tramite formule matematiche, inserite direttamente all'interno di apposite finestre di dialogo del simulatore. A tal proposito, si sottolinea che i software di System Dynamics appartengono ad una tipologia di *VIMS* (Visual Interactive Modelling Systems), nei quali ogni icona o simbolo grafico rappresenta un particolare tipo di variabile; connettendo tra di loro le icone si ricostruisce l'interazione logica tra le variabili del modello. Di conseguenza, i *VIMS* permettono di sviluppare un modello di simulazione al computer senza avere bisogno di un vero e proprio linguaggio di programmazione complesso. La susseguente simulazione del modello, consentita dall'impiego del software, permette infine l'osservazione prospettica del comportamento del sistema oggetto di modellizzazione. Nel complesso, quindi, è possibile costruire un intero ambiente informatizzato, composto da mappe, modelli matematico-statistici ed un'interfaccia grafica, che consente all'utente di interagire con il modello e trarre le proprie conclusioni.

# 2 Pandemia COVID-19: dataset e analisi dati

Delineati il modello di diffusione dell'innovazione e la metodologia di simulazione da applicare nel seguente lavoro di tesi, verranno ora illustrati i passi procedurali eseguiti per ottenere il dataset contenente i dati dei contagi giornalieri a livello interazionale ed esposta una prima rielaborazione di quest'ultimo con considerazioni sull'andamento dei contagi nelle varie zone geografiche.

## 2.1 Raccolta dei dati su scala globale

Nel seguente paragrafo, si espongono i passi procedurali tramite i quali è stato possibile dare alla luce un dataset atto a fornire i dati fondamentali che serviranno come input per i modelli di diffusione di COVID-19 sviluppati nella presente tesi.

In primis, per costruire un dataset affidabile, è stato necessario attingere alle informazioni fornite da chi in materia rappresenta l'ente più autoritario, ossia dal sito web ufficiale della *WHO*, dove quotidianamente viene reso noto il report mondiale, il *Situation reports*. All'interno di questo documento sono riportati i valori chiave dell'analisi epidemiologica. Tale aggiornamento restituisce una panoramica giornaliera dei casi e dei decessi di COVID-19 a livello globale e nazionale, così come altre informazioni pertinenti tale pandemia. I dati mondiali prelevati hanno riguardato in totale 215 Paesi, riportati in dettaglio nella *Tabella 1*.

|                                  |                                  |                                  |                                                |                                    |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------|
| Afghanistan                      | Comoros                          | Guinea-Bissau                    | Mexico                                         | San Marino                         |
| Albania                          | Congo                            | Guyana                           | Monaco                                         | São Tomé and Príncipe              |
| Algeria                          | Costa Rica                       | Haiti                            | Mongolia                                       | Saudi Arabia                       |
| Andorra                          | Côte d'Ivoire                    | Holy See                         | Montenegro                                     | Senegal                            |
| Angola                           | Croatia                          | Honduras                         | Montserrat                                     | Serbia                             |
| Anguilla                         | Cuba                             | Hungary                          | Morocco                                        | Seychelles                         |
| Antigua and Barbuda              | Curaçao                          | Iceland                          | Mozambique                                     | Sierra Leone                       |
| Argentina                        | Cyprus                           | India                            | Myanmar                                        | Singapore                          |
| Armenia                          | Czechia                          | Indonesia                        | Namibia                                        | Sint Maarten                       |
| Aruba                            | Democratic Republic of the Congo | Iran (Islamic Republic of)       | Nepal                                          | Slovakia                           |
| Australia                        | Denmark                          | Iraq                             | Netherlands                                    | Slovenia                           |
| Austria                          | Djibouti                         | Ireland                          | New Caledonia                                  | Somalia                            |
| Azerbaijan                       | Dominica                         | Isle of Man                      | New Zealand                                    | South Africa                       |
| Bahamas                          | Dominican Republic               | Israel                           | Nicaragua                                      | South Sudan                        |
| Bahrain                          | Ecuador                          | Italy                            | Niger                                          | Spain                              |
| Bangladesh                       | Egypt                            | Jamaica                          | Nigeria                                        | Sri Lanka                          |
| Barbados                         | El Salvador                      | Japan                            | North Macedonia                                | Sudan                              |
| Belarus                          | Equatorial Guinea                | Jersey                           | Northern Mariana Islands (Commonwealth of the) | Suriname                           |
| Belgium                          | Eritrea                          | Jordan                           | Norway                                         | Sweden                             |
| Belize                           | Estonia                          | Kazakhstan                       | occupied Palestinian territory                 | Switzerland                        |
| Benin                            | Eswatini                         | Kenya                            | Oman                                           | Syrian Arab Republic               |
| Bermuda                          | Ethiopia                         | Kosovo                           | Pakistan                                       | Tajikistan                         |
| Bhutan                           | Falkland Islands (Malvinas)      | Kuwait                           | Panama                                         | Thailand                           |
| Bolivia (Plurinational State of) | Faroe Islands                    | Kyrgyzstan                       | Papua New Guinea                               | Timor-Leste                        |
| Bonaire, Sint Eustatius and Saba | Fiji                             | Lao People's Democratic Republic | Paraguay                                       | Togo                               |
| Bosnia and Herzegovina           | Finland                          | Latvia                           | Peru                                           | Trinidad and Tobago                |
| Botswana                         | France                           | Lebanon                          | Philippines                                    | Tunisia                            |
| Brazil                           | French Guiana                    | Lesotho                          | Poland                                         | Turkey                             |
| British Virgin Islands           | French Polynesia                 | Liberia                          | Portugal                                       | Turks and Caicos Islands           |
| Brunei Darussalam                | Gabon                            | Libya                            | Puerto Rico                                    | Uganda                             |
| Bulgaria                         | Gambia                           | Liechtenstein                    | Qatar                                          | Ukraine                            |
| Burkina Faso                     | Georgia                          | Lithuania                        | Republic of Korea                              | United Arab Emirates               |
| Burundi                          | Germany                          | Luxembourg                       | Republic of Moldova                            | The United Kingdom                 |
| Cabo Verde                       | Ghana                            | Madagascar                       | Réunion                                        | United Republic of Tanzania        |
| Cambodia                         | Gibraltar                        | Malawi                           | Romania                                        | United States of America           |
| Cameroon                         | Greece                           | Malaysia                         | Russian Federation                             | United States Virgin Islands       |
| Canada                           | Greenland                        | Maldives                         | Rwanda                                         | Uruguay                            |
| Cayman Islands                   | Grenada                          | Mali                             | Saint Barthélemy                               | Uzbekistan                         |
| Central African Republic         | Guadeloupe                       | Malta                            | Saint Kitts and Nevis                          | Venezuela (Bolivarian Republic of) |
| Chad                             | Guam                             | Martinique                       | Saint Lucia                                    | Viet Nam                           |
| Chile                            | Guatemala                        | Mauritania                       | Saint Martin                                   | Yemen                              |
| China                            | Guernsey                         | Mauritius                        | Saint Pierre and Miquelon                      | Zambia                             |
| Colombia                         | Guinea                           | Mayotte                          | Saint Vincent and the Grenadines               | Zimbabwe                           |

**Tabella 1:** Lista dei Paesi in ordine alfabetico registrati nel dataset

Dunque, i dati prelevati sono stati suddivisi per data e registrati giornalmente su un foglio di calcolo Excel, dove sono stati separati in quattro colonne differenti riportanti i valori dei nuovi contagi e dei nuovi decessi, in aggiunta al numero cumulato di casi e di decessi propri di ogni singolo paese. La scelta delle variabili registrate nel dataset è stata dettata dall'esigenza di stimare i valori dell'infettività relativa a ogni Paese, necessaria per l'implementazione del modello ed inoltre, i valori cumulati serviranno per confrontare l'andamento simulato ottenuto con quello reale, andando ad effettuare un'analisi di bontà sul modello.

Inoltre, i *Situation reports* forniscono i dati relativi unicamente ai Paesi che presentano al loro interno casi di COVID-19, andando quotidianamente ad aggiungere all'elenco i nuovi entranti, comportando per ogni Stato una data di inizio pandemia differente. Tuttavia, è stata adottata come prima data di registrazione dei dati quella riportata nel primo report della *WHO* riguardante solamente la Cina, cioè il 20 gennaio 2020, nonostante, i primi casi si fossero già registrati a dicembre 2019, come riportato nella sezione 1.1.

Per quanto riguarda l'ultima data di registrazione dei dati, si è identificata per tutti i Paesi il 31 maggio 2020, data alla quale erano terminati i primi periodi di *lockdown* in Italia e in gran parte dei paesi europei

In aggiunta, volendo arricchire ulteriormente il dataset creato, si è ritenuto necessario includere anche i dati di guarigione, non resi però disponibili dalla fonte inizialmente utilizzata, motivo per il quale sono stati attinti da siti differenti quali: Il *Sole24ore (lab24)* per quanto riguarda i dati dell'Italia [12]; *Worldmeters* e la *John Hopkins University & Medicine* per i restanti Paesi [13] [14]. I siti citati, tuttavia, non forniscono i dati di guarigione in modo facilmente fruibile, e per questa ragione non è stata possibile la raccolta di tali dati per tutti gli Stati del mondo. Pertanto, nell'impossibilità di tenerne traccia in maniera agevole si è deciso di registrare, da gennaio 2020 a maggio 2020, le guarigioni per soli tre Stati, in modo da non mantenere il focus unicamente sull'Italia, ma di conservare la visione internazionale citata nel paragrafo 1.1:

- Italia;
- Stati Uniti;
- Cina.

Per ognuno dei Paesi sopra citati, quindi, sono stati aggiunti manualmente i valori di guarigione giornalieri e cumulati al fine di poter eventualmente stimare un tasso di guarigione nel tempo. Infine, è doveroso affermare che il dataset costruito, riportato in *Allegato 1*, presenta un totale di 18.403 righe, ossia 18.403 dati giornalieri raccolti, per 215 Paesi, nell'arco temporale 20/01/2020 - 31/05/2020. In Tabella 2 si riportano le variabili rappresentate nel dataset,

andando a fornirne una più dettagliata descrizione.

|                        | NUMERO<br>TOTALE<br>CONTAGI | NUMERO<br>NUOVI<br>CONTAGI | NUMERO<br>TOTALE<br>DECESSI | NUMERO<br>NUOVI<br>DECESSI | NUMERO<br>NUOVI<br>GUARITI | NUMERO<br>TOTALE<br>GUARITI |
|------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| VALORE<br>MAX          | 1.716.078                   | 38.509                     | 101.567                     | 5.475                      | 22.000                     | 418.000                     |
| VALORE<br>MIN          | 1                           | 0                          | 0                           | 0                          | 0                          | 0                           |
| VALORE<br>MEDIO        | 11.296,01615                | 323,8130506                | 736,4122349                 | 20,17645459                | 1.911,482456               | 65.990,12281                |
| DEVIAZIONE<br>STANDARD | 69.622,47715                | 1.833,065597               | 4.723,779295                | 136,5004875                | 3.438,143977               | 81.228,53528                |
| PRIMO<br>QUARTILE      | 18                          | 0                          | 0                           | 0                          | 33                         | 2.382                       |
| SECONDO<br>QUARTILE    | 191                         | 5                          | 4                           | 0                          | 694,5                      | 54.973                      |
| TERZO<br>QUARTILE      | 1.802                       | 63                         | 42                          | 1                          | 2.173,5                    | 7.9120,5                    |
| QUARTO<br>QUARTILE     | 1.716.078                   | 38.509                     | 101.567                     | 5.475                      | 22.000                     | 418.000                     |

**Tabella 2:** Analisi delle variabili presenti nel dataset

### 2.1.1 Correzioni apportate al dataset

Dopo aver concluso la registrazione dei dati sono emerse alcune incongruenze e mancanze all'interno del dataset stesso, che sono state affrontate nei seguenti modi:

- La prima mancanza riguarda i valori dei contagi e dei decessi della Cina in data 22 gennaio 2020, poiché dichiarato valore non attendibile dalla *WHO* stessa.
- Osservando nel dettaglio i dati è emerso come alcuni di essi fossero tra loro incongruenti, mostrando un numero di nuovi contagi giornaliero non corrispondente all'incremento presente nel numero dei contagi cumulati. In questi casi si è ritenuto opportuno procedere mantenendo come riferimento il dato dei contagi totali e ricalcolando i nuovi contagi.
- Un ulteriore corregge è stato apportato nel caso dell'Algeria, in quanto il *Situation report* riporta i seguenti dati [15]:

|            |         |                   |                  |
|------------|---------|-------------------|------------------|
| 17/03/2020 | ALGERIA | totali contagi 60 | Nuovi contagi 11 |
| 18/03/2020 | ALGERIA | totali contagi 60 | Nuovi contagi 11 |

Nel caso sopra riportato si è assunto come corretto il dato del 17/03/2020 ed assegnato valore nullo ai contagi il giorno successivo.

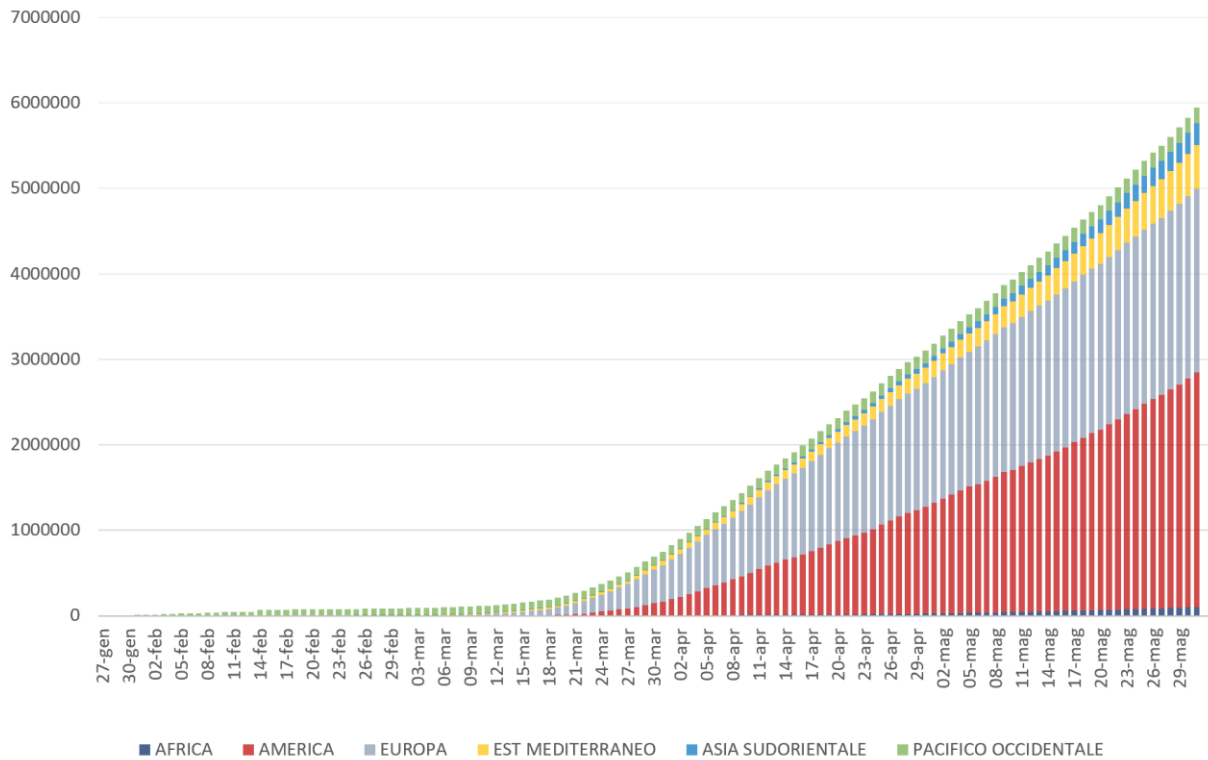
### 2.1.2 Limitazioni del dataset

È importante precisare che la raccolta dati creata, come detto nel paragrafo 2.1, è basata su dati ufficiali ma senza alcun tentativo di correzione che consideri le disomogeneità nelle diverse modalità di raccolta tra i Paesi, in quanto apportare modifiche di tale entità al dataset potrebbe condurre ad una distorsione dei dati stessi oltre ad essere di complessa attuazione. Tra queste si riportano il diverso numero di tamponi effettuati e gli altrettanto differenti criteri di attribuzione dei decessi, nel caso di pazienti affetti da COVID-19 e al contempo da ulteriori cause di morte. Inoltre si assume che il conteggio dei contagiati sottostimi i numeri reali e che nei Paesi avanzati i pazienti che presentano sintomi significativi siano stati in gran parte censiti. Questa assunzione trova conferma alla luce dei numerosi casi asintomatici presenti tra la popolazione, che non presentando sintomi non vengono, nella maggior parte dei casi, sottoposti a tampone ma, oltre a non comparire nel conteggio dei casi di positività al virus del proprio Paese, possono anche circolare liberamente nella società e inconsiamente portare ad una più rapida diffusione del virus SARS-CoV-2. Tuttavia, questi individui non dovrebbero incidere significativamente sul livello dei decessi.

## 2.2 Analisi dell'andamento globale di contagi

Nella presente sezione viene esposta una panoramica sull'andamento globale dei contagi fotografata al 31 maggio 2020 e ottenuta eseguendo una rielaborazione matematico-statistica dei dati raccolti, senza ricorrere a specifiche competenze epidemiologiche. L'obiettivo è quello di evidenziare il trend di crescita della diffusione del virus a livello globale e di portare in primo piano gli aspetti maggiormente significativi estratti dal dataset stesso. L'analisi sotto riportata permetterà quindi di mettere in luce alcune somiglianze e differenze nella diffusione dei contagi nei vari Paesi.

Il confronto tra gli andamenti dei casi registrati di COVID-19 a livello globale è raffigurato in *Figura 11*, elaborata attraverso i dati presenti nel dataset. Quest'ultima per semplicità suddivide i Paesi del mondo in sei macroaree quali: Africa, Americhe, Est Mediterraneo, Europa, Asia Sudorientale e Pacifico Occidentale; quindi viene determinata per ogni macroarea il numero totale dei casi confermati e dei decessi, elaborati in base ai numeri presenti nel dataset e riportati in *Tabella 3*.

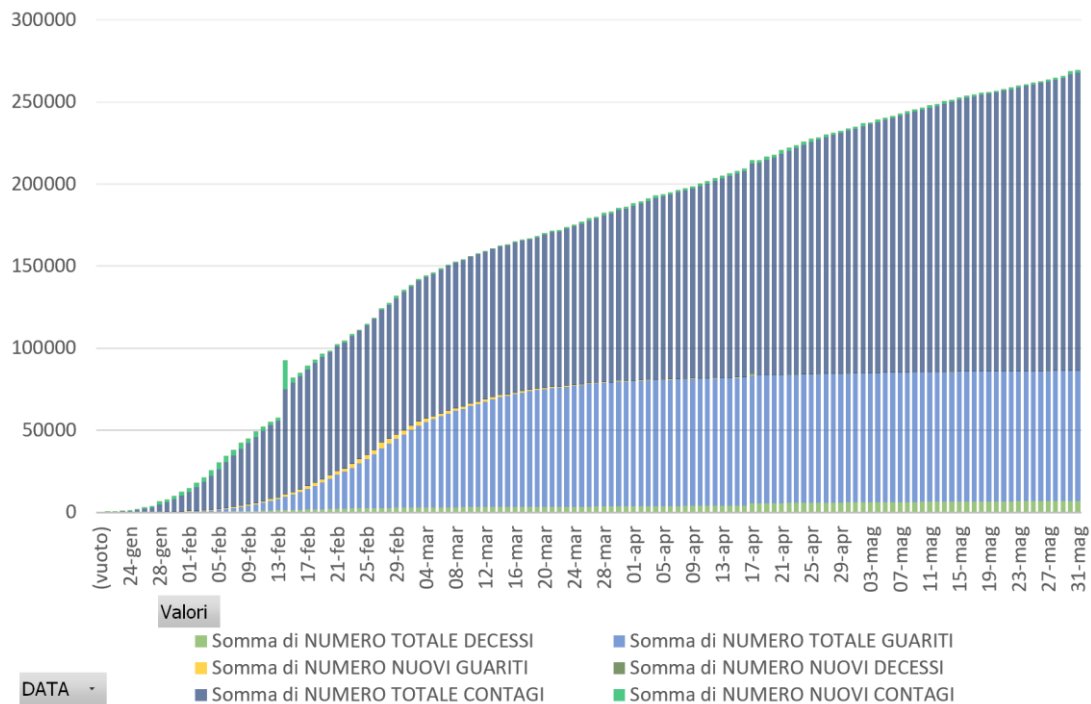


**Figura 11** Grafico che mostra il numero di nuovi casi confermati di Covid-19 dal 27 gennaio 2020 al 31 maggio

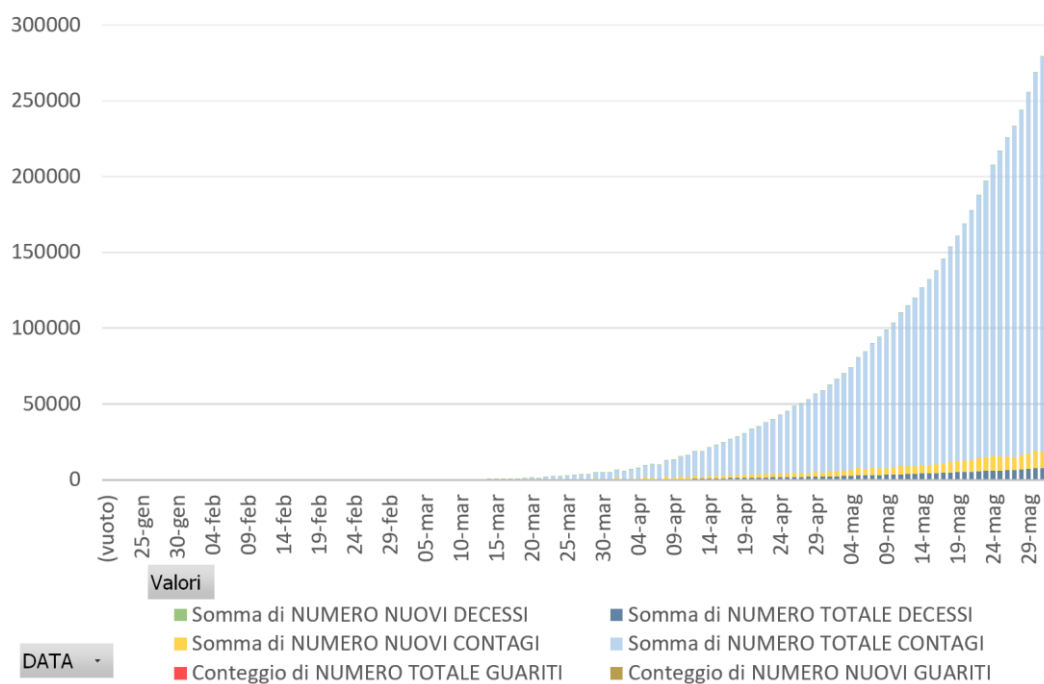
|                             | NUMERO TOTALE DI CONTAGI | NUMERO TOTALE DECESSI |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| <i>AFRICA</i>               | 100.623                  | 2.554                 |
| <i>AMERICHE</i>             | 2.743.813                | 157.702               |
| <i>EST MEDITERRANEO</i>     | 505.001                  | 12.356                |
| <i>EUROPA</i>               | 2.155.049                | 182.005               |
| <i>ASIA SUDORIENTALE</i>    | 260.579                  | 7.431                 |
| <i>PACIFICO OCCIDENTALE</i> | 181.665                  | 7.028                 |
| <i>GLOBALE</i>              | 5.946.730                | 369.076               |

**Tabella 3:** Numero dei casi confermati di COVID-19 divisi per macroarea al 31 maggio 2020

Nello specifico vengono ora riportati in *Figura 12, 13, 14, 15, 16 e 17* i grafici raffiguranti gli andamenti delle diverse variabili presenti nel dataset per ogni macroarea, rendendo così maggiormente immediato il confronto.

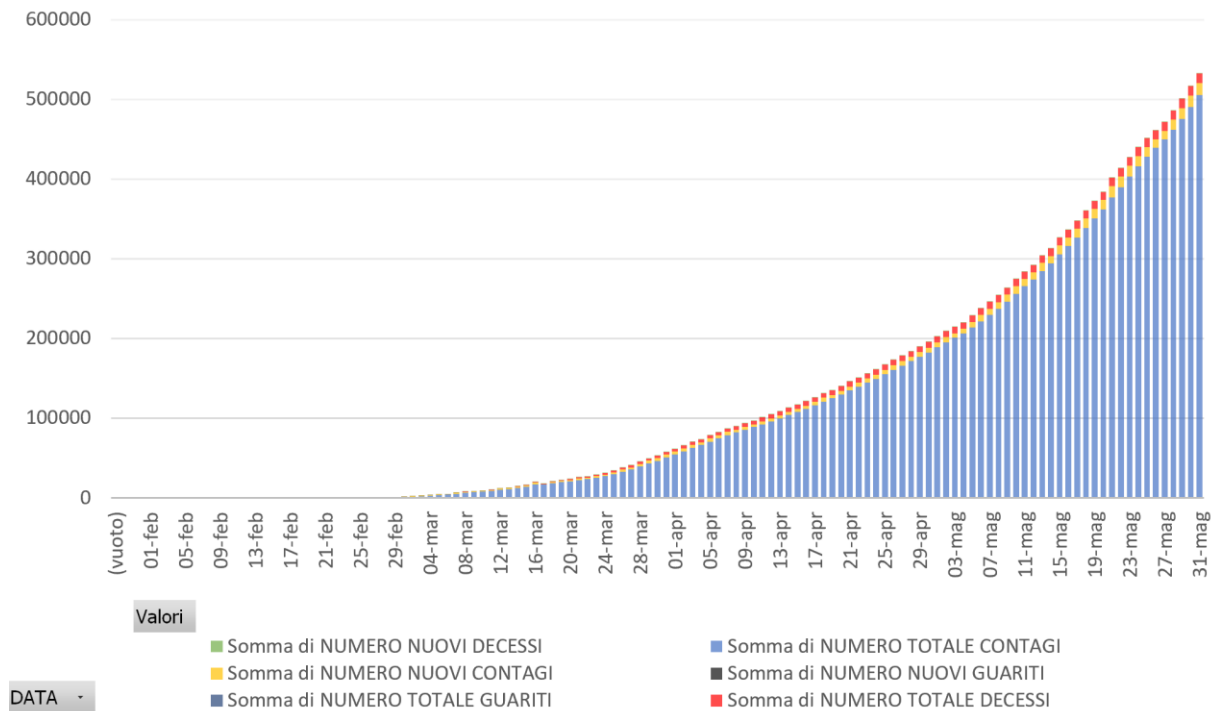


**Figura 12:** Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea del Pacifico Occidentale

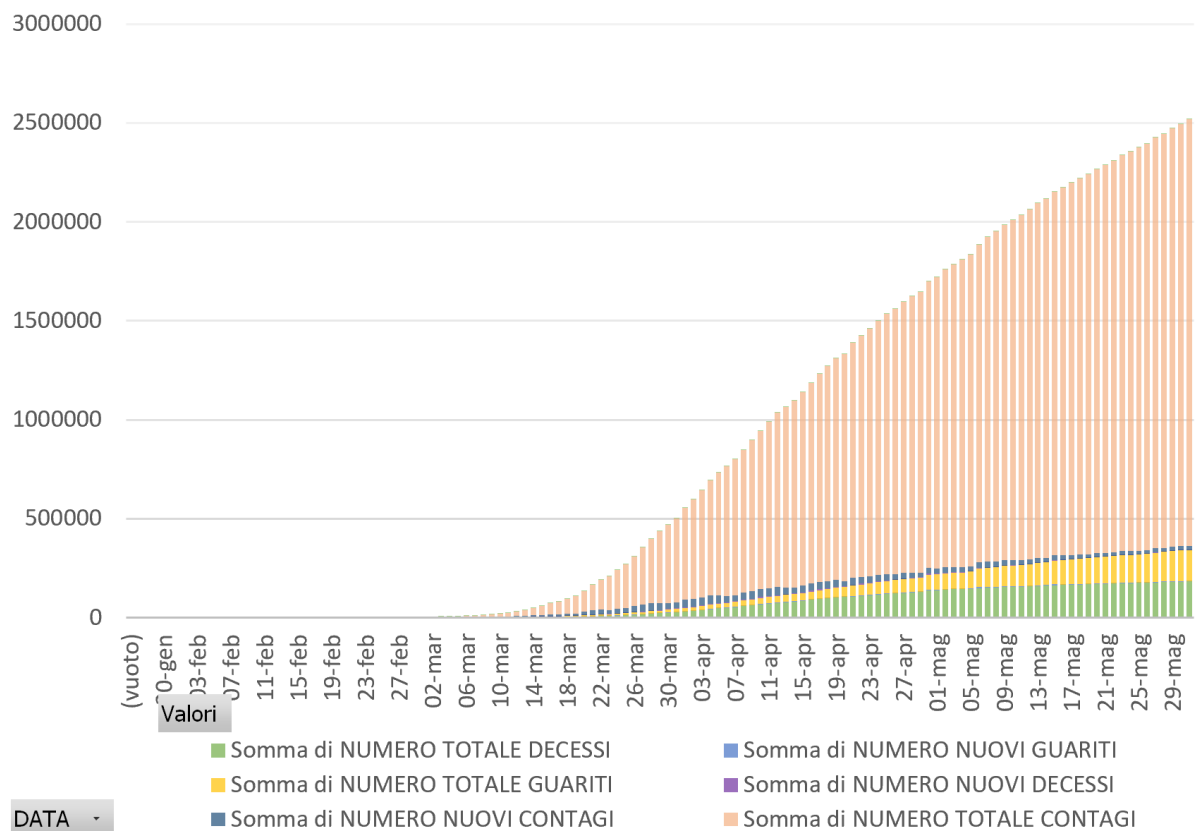


**Figura 13:** Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Asia Sudorientale

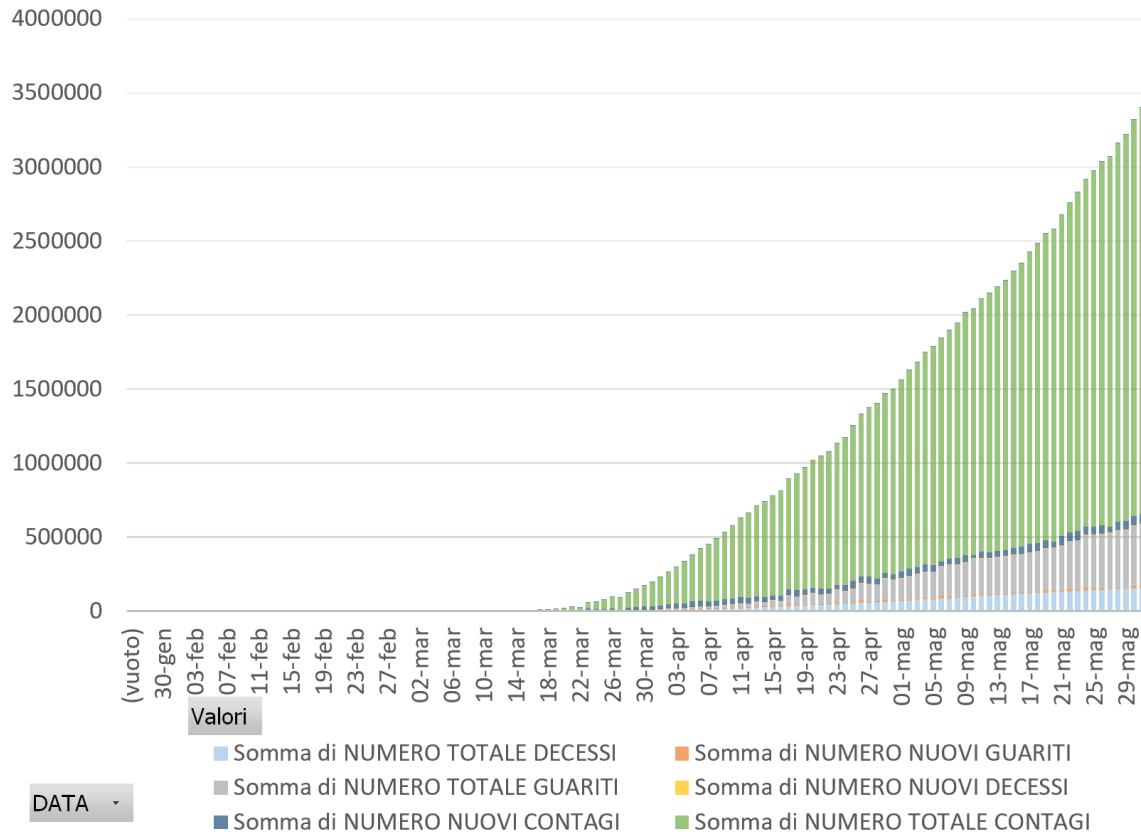




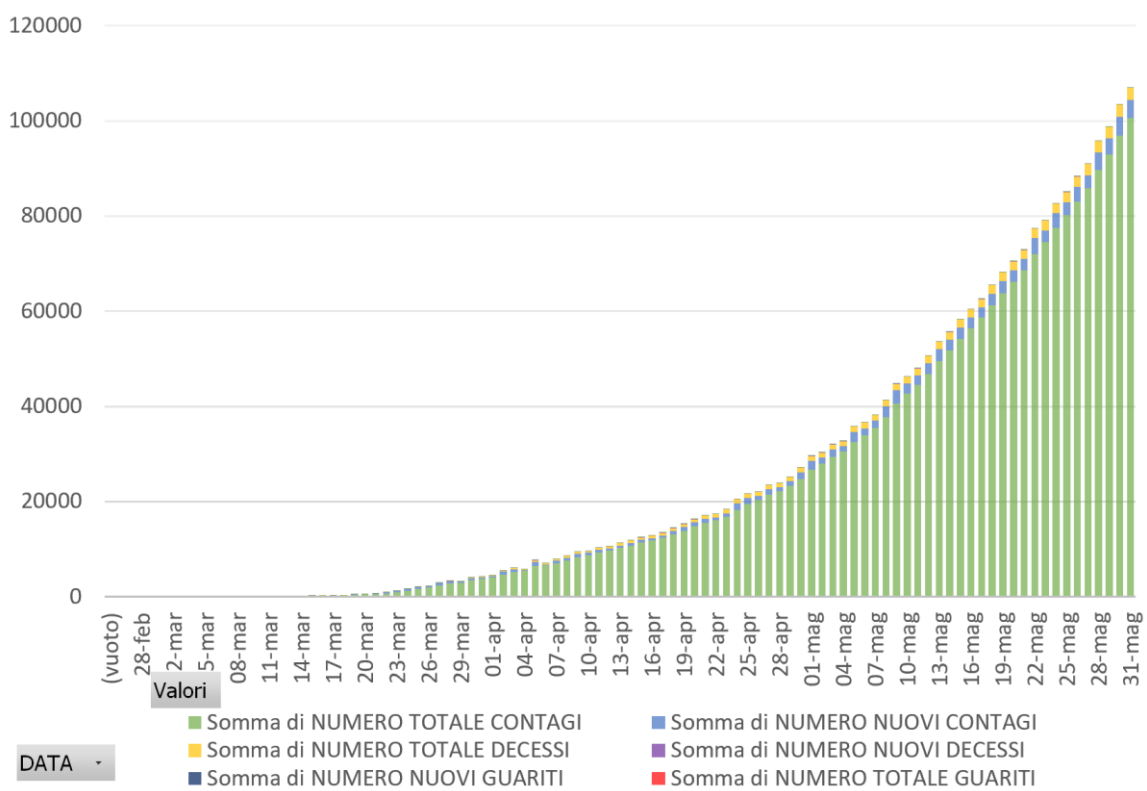
**Figura 14:** Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Est Mediterraneo



**Figura 15:** Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Europa

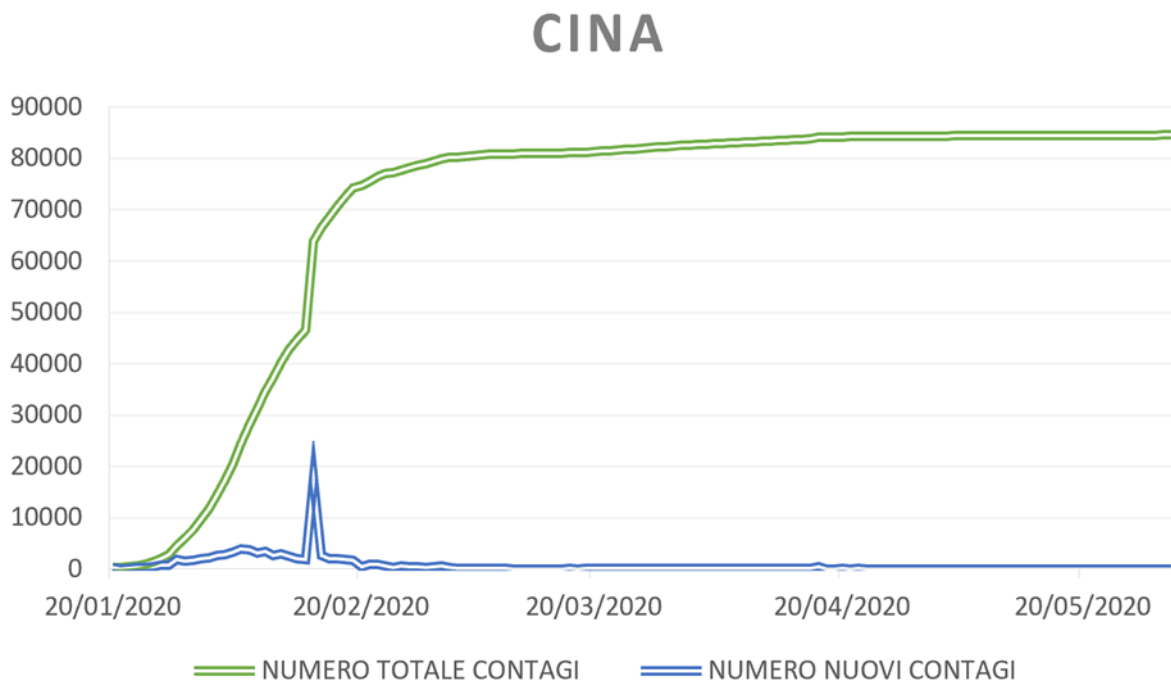


**Figura 16:** Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea delle Americhe



**Figura 17:** Andamenti delle variabili presenti nel dataset per la macroarea dell'Africa

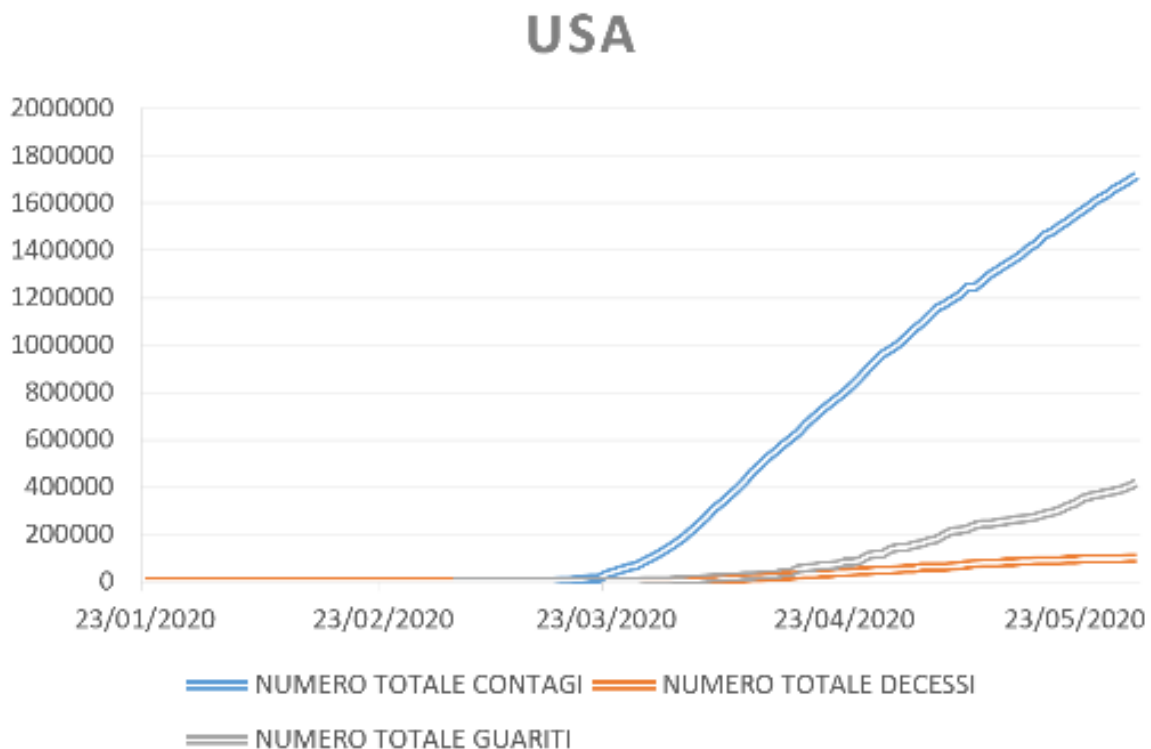
A tal proposito, è possibile notare una crescita esponenziale dei casi di contagi in tutte le macroaree mondiali in un solo mese, ad eccezione del Pacifico occidentale, nel quale i casi di positività sembrano diffondersi con un andamento meno impetuoso, questo dal momento che uno dei paesi a farne parte risulta essere la Cina. Infatti, anche se il Paese dal quale tutto è scaturito, al 31 maggio 2020 la situazione risulta nettamente più sotto controllo, con 84.570 casi e 4.645 decessi, presentando un trend pressoché stabile e una coda stazionaria di basso livello epidemico, come si evince dalla *Figura 18*, elaborata in base ai dati presenti nel dataset.



**Figura 18:** Grafico raffigurante il numero di nuovi contagi giornalieri e cumulati di COVID-19 della Cina

La Cina sembra, dunque, aver trovato ormai una stabilità, motivo per cui la quantità di guariti raffigurata risulta essere così elevata, a discapito della bassa percentuale di contagiati invece deceduti. Dall'altro lato, i valori più preoccupanti riguardano le Americhe e l'Europa, che oltrepassano entrambe i due milioni di contagi e i 150.000 morti, mentre per quanto riguarda l'Africa, l'Est Mediterraneo e l'Asia Sudorientale, la situazione sembrerebbe più sotto controllo, sebbene la diffusione si dimostri essere in rapida crescita. Questo più basso livello di contagi e di mortalità registrato potrebbe essere dovuto alla bassa età media che contraddistingue l'Africa ed alcuni Paesi che fanno parte dell'Asia Sudorientale, come la Thailandia e, dell'Est Mediterraneo come l'Arabia Saudita. Infatti secondo la *Johns Hopkins University*, i giovani hanno più probabilità di essere asintomatici o presentare lievi sintomi, per cui, trasmetterebbero meno frequentemente il virus [14]. Inoltre, secondo la *WHO*,

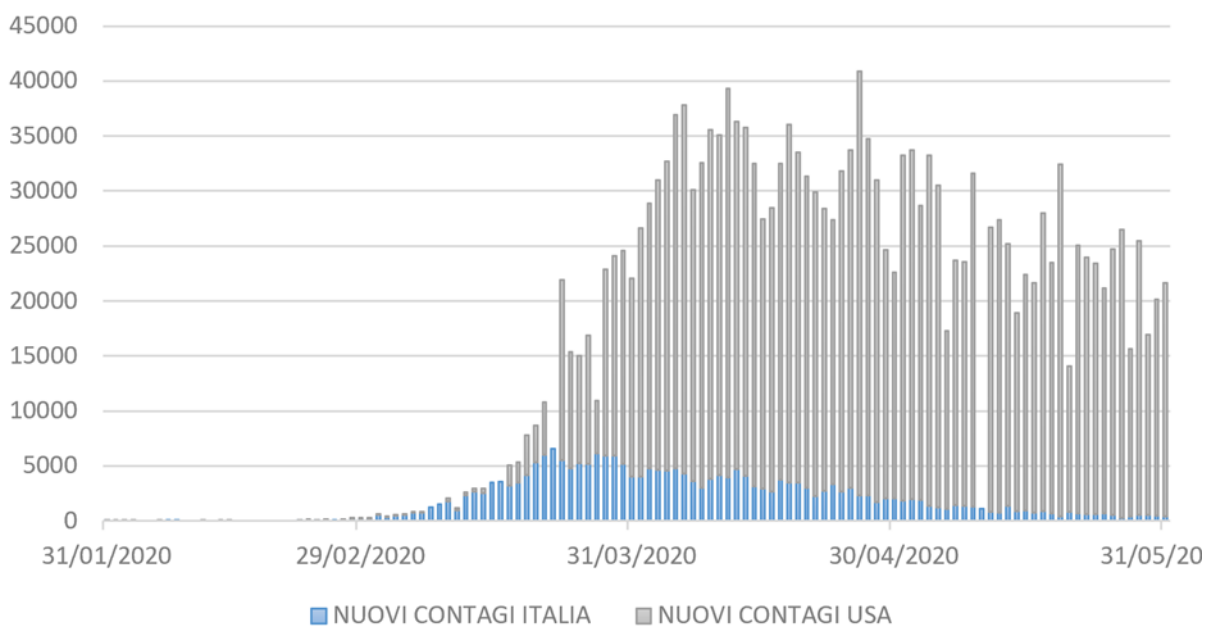
presenterebbero anche una tendenza minore a sviluppare problematiche che potrebbero aumentare la mortalità del COVID-19, giustificando dunque il relativamente basso livello di decessi registrato in tali macroaree. In tal senso, è possibile notare in contrapposizione, che macroaree come quella dell'Europa presentano invece un più alto tasso di mortalità, oltre che del numero di contagi, un esempio potrebbe essere l'Italia che, con un'età media superiore ai 45 anni, è stata la prima nazione dopo la Cina a vedere insorgere violentemente il virus [16]. Tuttavia, l'espansione della pandemia risulta essere notevolmente più rapida nel continente americano, dove risaltano i casi del Brasile e degli USA. Infatti, gli Stati Uniti d'America rappresentano il Paese con trend in assoluto più preoccupante, con ormai oltre il milione di casi confermati (1.716.078) e più di 100.000 morti (101.567), come osservabile in *Figura 3*. Nonostante l'alto numero di casi positivi, grazie ai dati forniti dalla *Johns Hopkins University*, si può affermare però che il numero di guariti giornalieri è in aumento, con una crescita del 62,58% rispetto alla settimana precedente (25 maggio 2020) [14].



**Figura 19:** Grafico raffigurante il numero totale di contagi, decessi e guariti di COVID-19 degli USA

Il caso degli Stati Uniti D'America è particolarmente significativo anche alla luce delle ordinanze governative adottate; infatti non sono mai state effettuate politiche atte al contenimento della diffusione del virus. Questa decisione ha portato gli USA ad avere un

aumento esponenziale del numero dei casi, come si evince dal grafico, basato sui dati del dataset, in *Figura 19*, fino ad arrivare a guadagnare il titolo di Paese maggiormente colpito. A dimostrazione dell'efficacia dell'introduzione tempestiva delle misure restrittive, si citano i casi del Vietnam e della Grecia, che hanno evitato in questo modo un contagio fuori controllo e quello dell'Italia, la quale in seguito all'adozione di diverse misure restrittive è riuscita nell'intento di abbassare il numero dei contagi giornalieri. È infatti possibile notare dalla *Figura 20* come la curva dei nuovi infetti riportati dal dataset nel caso italiano assuma un trend decrescente in seguito al picco registratosi a marzo 2020, segnando un decremento di oltre 88%, al contrario del caso americano.



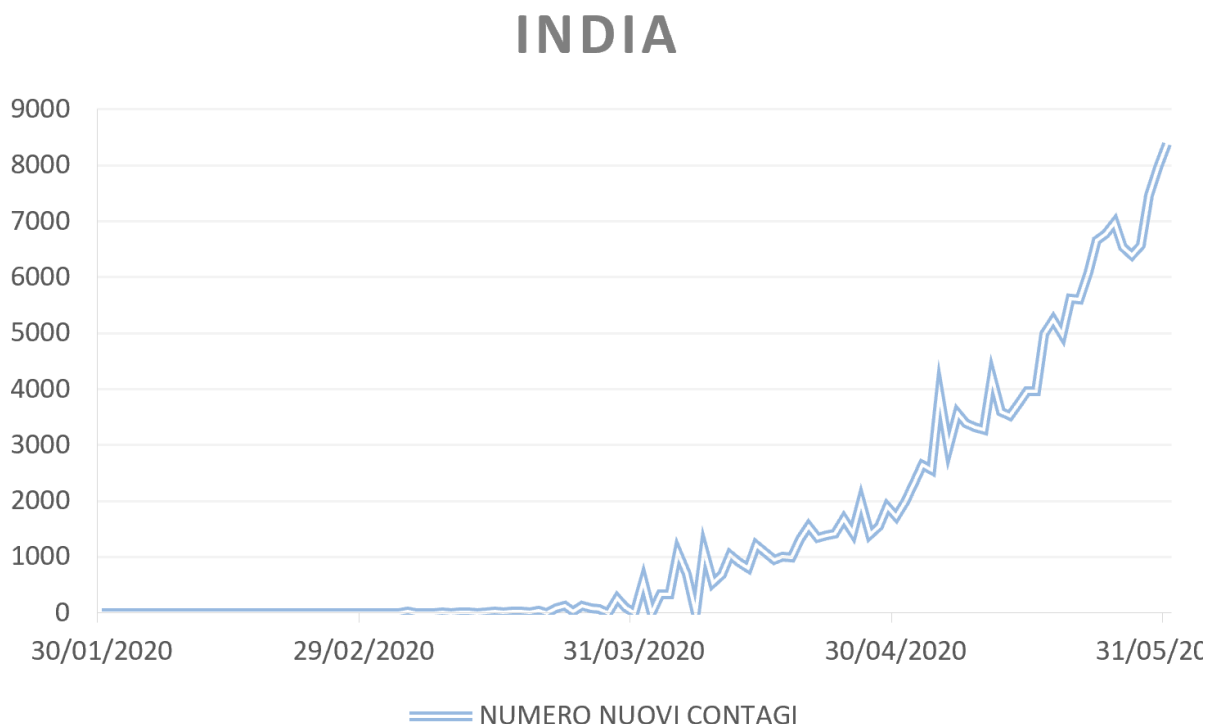
**Figura 20:** Grafico che rappresenta il numero giornaliero di nuovi contagi registrati in Italia e negli USA

Un discorso simile potrebbe riguardare anche il continente africano, che essendo caratterizzato da Paesi con una certa esperienza per le malattie mortali come l'aids, la tubercolosi e l'ebola, potrebbero aver riportato valori più contenuti in quanto più preparati a reagire prontamente. Nonostante questi valori siano molto inferiori a quelli raggiunti da altre macroaree, è importante che vengano contestualizzati in modo corretto. Infatti tali numeri potrebbero non essere esageratamente allarmanti in Paesi avanzati, ma considerata la fragilità di molti apparati sanitari africani e l'inadeguatezza delle strutture risulta fondamentale la capacità di individuare e arginare tempestivamente la diffusione del contagio. Inoltre, un ulteriore aspetto che potrebbe essersi rivelato chiave nella diffusione più contenuta in tale macroarea, potrebbe risiedere nella tipologia di clima che la caratterizza. Infatti, il virus SARS-CoV-2, sembrerebbe prediligere climi freddi e secchi, con temperature medie di 5°C e umidità medio-bassa, mentre con climi

caldi e umidi sembrerebbe diffondersi molto più lentamente, anche se nessuna area popolata del mondo sembra essere completamente inidonea alla diffusione [17]. Tuttavia, anche se tale ipotesi si dovesse confermare non corretta, sarebbe necessario considerare tutti gli aspetti legati ad un clima più caldo, come la tendenza a trascorrere più tempo in luoghi aperti, dove la diffusione del virus rallenta drasticamente e, alle superfici contaminate, che se esposte a temperature maggiori e al sole riducono il loro potere infettivo.

Per quanto riguarda la macroarea dell'Asia sudorientale, risulta interessante come i numeri relativamente bassi del virus possano essere dovuti a fattori culturali, come la naturale tendenza a mantenere le distanze nella società. Nel caso della Thailandia e dell'India, appartenenti all'Asia Sudorientale, le persone si salutano senza contatti ma congiungendo le mani, al contrario di quanto succede in Europa o in America, dove i contatti interpersonali risultano molto più calorosi.

Tuttavia, anche l'India ha raggiunto un totale di 5.164 decessi e di 182.143 casi confermati, riscontrando un aumento del 5% rispetto al giorno precedente e del circa 388% dal 30 aprile 2020, come si evince dalla *Figura 21*, estrapolata dei dati presenti nel dataset.

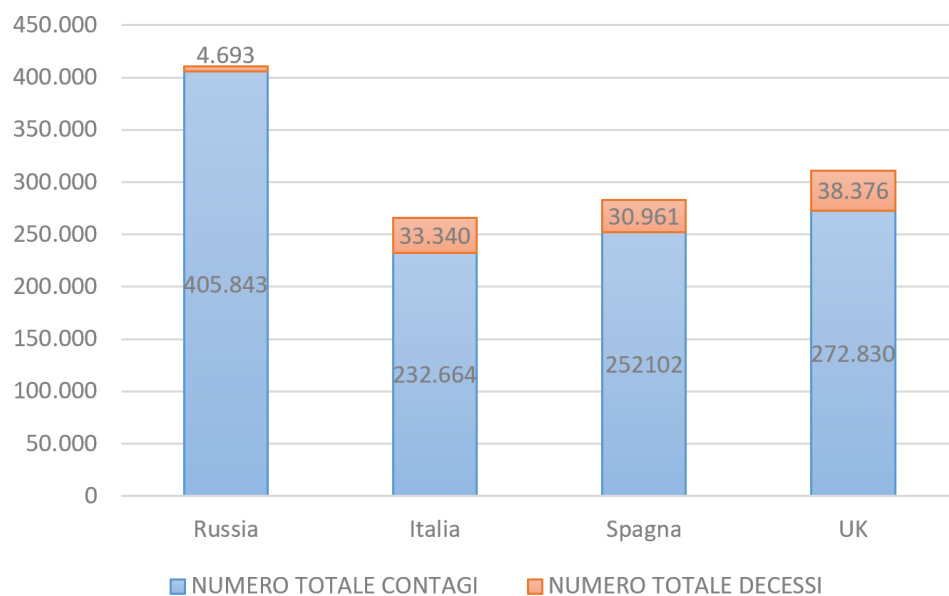


*Figura 21:* Grafico che raffigura il numero di nuovi casi di COVID-19 giornalieri in India.

Nel caso della macroarea dell'Est Mediterraneo invece, a parte l'Iran violentemente colpito, l'andamento della diffusione descritto risulta infatti inferiore ad altre macroaree e questo potrebbe

derivare dal cosiddetto *distanziamento nazionale*, infatti i Paesi relativamente isolati hanno riscontrato effetti sanitari positivi. Infatti a causa dei conflitti armati presenti in Siria ed in Libia, questi sono stati protetti dalla relativa assenza di viaggiatori e lo stesso vale per Paesi come il Libano e l'Iraq, segnati da violente proteste.

Focalizzandosi ora sull'Europa, i Paesi maggiormente colpiti si sono dimostrati essere la Russia, il Regno Unito, la Spagna e, come detto pocanzi, l'Italia, che insieme raggiungono quasi il milione di casi confermati (911.337) e 105.452 decessi, su un totale europeo di 2.155.049 contagiati e 182.005 morti. Nello specifico, la Russia che da sola ha raggiunto i 405.843 casi positivi presenta la curiosa particolarità di possedere un numero di decessi insolitamente basso. Il numero di decessi imputati al COVID-19 da inizio pandemia è infatti di 4.693, che rappresenta l'1,16% delle persone totali contagiate nel Paese. Tale percentuale risulta davvero bassa se confrontata con quella degli altri paesi europei (*Figura 22*): Italia 14,3%, Spagna 12,1%, Regno Unito 14%. Come riportato nella sezione 2.1.2, ogni nazione è caratterizzata da differenti modalità di calcolo dei decessi imputabili al COVID-19, non essendo standardizzate, per cui la Russia potrebbe aver adottato un criterio che prevede il calcolo dei soggetti deceduti unicamente di SARS-CoV-2, escludendo tutti gli individui morti con il COVID-19 ma che presentavano altre patologie pregresse.



**Figura 22:** Grafico di confronto tra Russia, Italia, Regno Unito e Spagna riguardo ai numeri di decessi e contagi

Dall'analisi critica appena condotta sugli andamenti della diffusione della pandemia COVID-19 nelle diverse macroaree del mondo è possibile trarre alcune considerazioni, in primis risulta

evidente l'importanza delle misure restrittive, che applicate tempestivamente si sono dimostrate capaci di ribaltare completamente l'andamento della pandemia e salvare la popolazione da un'emergenza sanitaria di grande entità. In secondo luogo, è apparso un aspetto chiave della diffusione della malattia infettiva anche il fattore culturale proprio di ogni popolo, in grado di favorire o meno la socialità e quindi la velocità di contaminazione. Si è poi analizzato come anche l'età media di ogni nazione possa influire sul numero di casi di positività ma soprattutto sul tasso di mortalità di un determinato stato, in quanto i giovani risultano nella maggior parte asintomatici. Per concludere si è visto come la temperatura ed il clima di un paese possano aiutare al contenimento del virus, ma non alla sua scomparsa, sia per quanto riguarda le superfici, che risultano meno contagiose se esposte al sole, sia per la maggior propensione a frequentare luoghi aperti.



# 3 Modelli SD creati, scenari ipotizzati e risultati ottenuti

Delineata la metodologia System Dynamics applicata al modello di diffusione di Bass come approccio atto a modellare e simulare le dinamiche evolutive di diffusione della pandemia COVID-19, l'elaborato prosegue con la descrizione del modello appositamente creato. Seguirà la calibrazione di questo al fine di consentire la costruzione di ulteriori modelli in grado di rispecchiare l'andamento dei contagi riscontrato in Paesi selezionati. In seguito, verrà testata la bontà dei modelli creati, andando a confrontare l'andamento stimato dal modello di SD con quello reale che si evince dal dataset stesso. A questo punto verranno ipotizzati tre scenari per Paese, nei quali si modificherà il valore della variabile rappresentante i contatti tra individui, in modo da raffigurare differenti misure restrittive potenzialmente adottabili per il contenimento della pandemia. Infine, si confronteranno i risultati ottenuti, fornendone una discussione critica.

## 3.1 Descrizione del modello SD per la diffusione del COVID-19

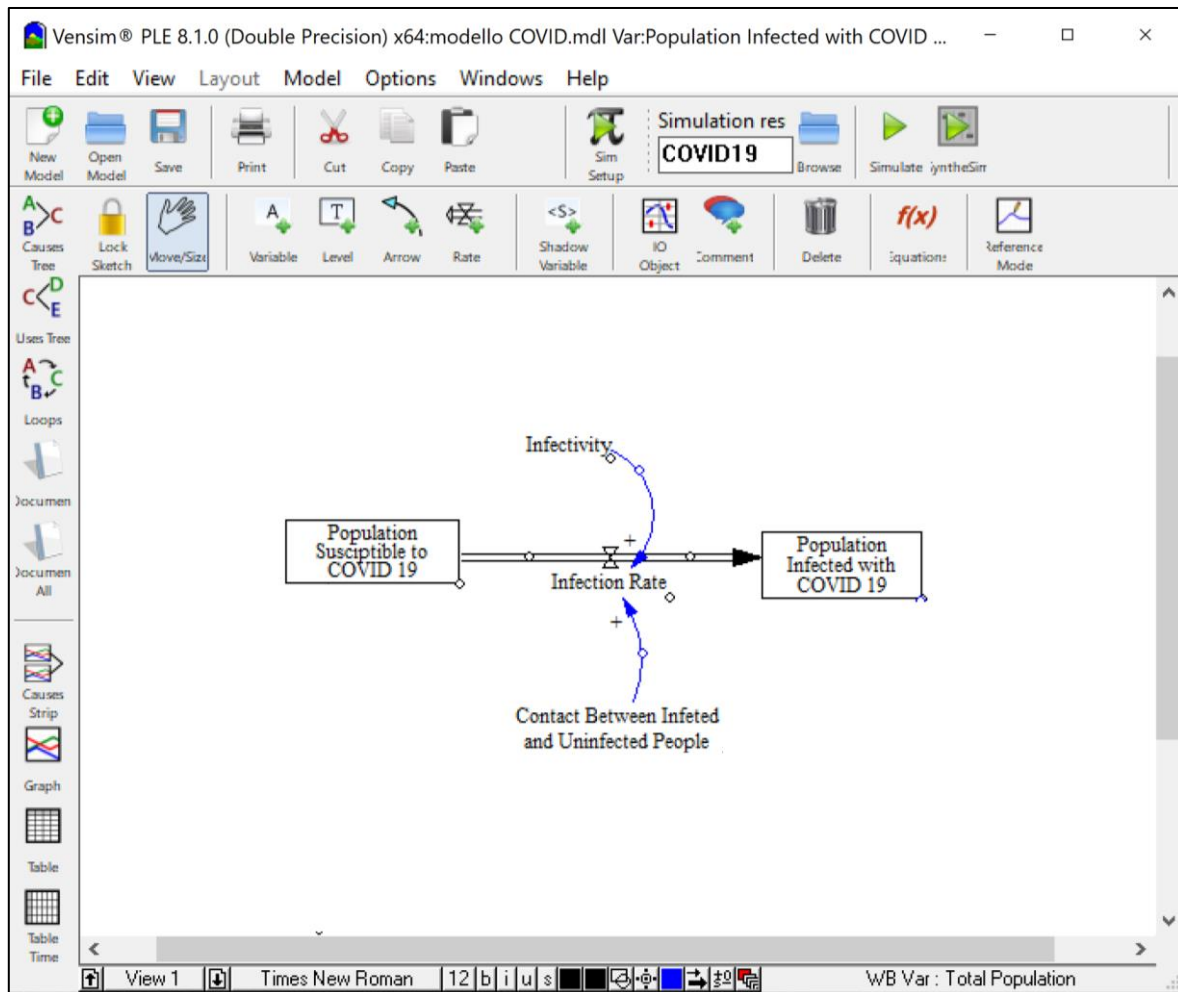
Nel presente paragrafo si espongono i passi procedurali tramite i quali è stato possibile realizzare un modello di System Dynamics idoneo a descrivere l'andamento della diffusione del COVID-19, esponendone gli aspetti cardine e le assunzioni.

La metodologia di modellizzazione adottata è stata implementata utilizzando *VensimPLE*, software di simulazione sviluppato da *Ventana Systems* [18].

In primis è stato necessario definire l'orizzonte temporale di simulazione desiderato, inizialmente impostato uguale a 120 giorni, introducendo anche il valore di time step giornaliero, come riportato in *Figura 23*.

**Figura 23:** Finestra di input per l'inserimento delle impostazioni del modello

In seguito, sono stati creati i due stock cardine del modello: **Population Susceptible to COVID-19**, che tiene traccia del numero di persone non affette dal virus in un certo istante di tempo e che dunque risulta potenzialmente suscettibile di contrarlo. **Population Infected with COVID-19**, raffigurante invece il numero di persone che ha contratto tale malattia fino ad un determinato istante di tempo. Di conseguenza, si è proseguito congiungendo i due stock attraverso il flow denominato **Infection Rate**, in modo da rendere possibile la diminuzione del livello del primo stock all'aumentare della dimensione del secondo; infatti, le persone che contrarranno il COVID-19, passeranno dall'appartenere al gruppo degli individui suscettibili all'essere parte di quelli contagiati. Come si evince dalla *Figura 24*, sono state successivamente introdotte due variabili ausiliarie determinanti l'**Infection Rate**: l'**Infectivity** e la **Contact Between Infected and Uninfected People**. La prima rappresenta l'infettività intrinseca al virus stesso e, quindi, la probabilità che vi sia trasmissione in caso di contatto tra un individuo infetto e uno suscettibile. La seconda, invece, tiene traccia del numero di contatti verificatosi quotidianamente tra persone infette e sane.



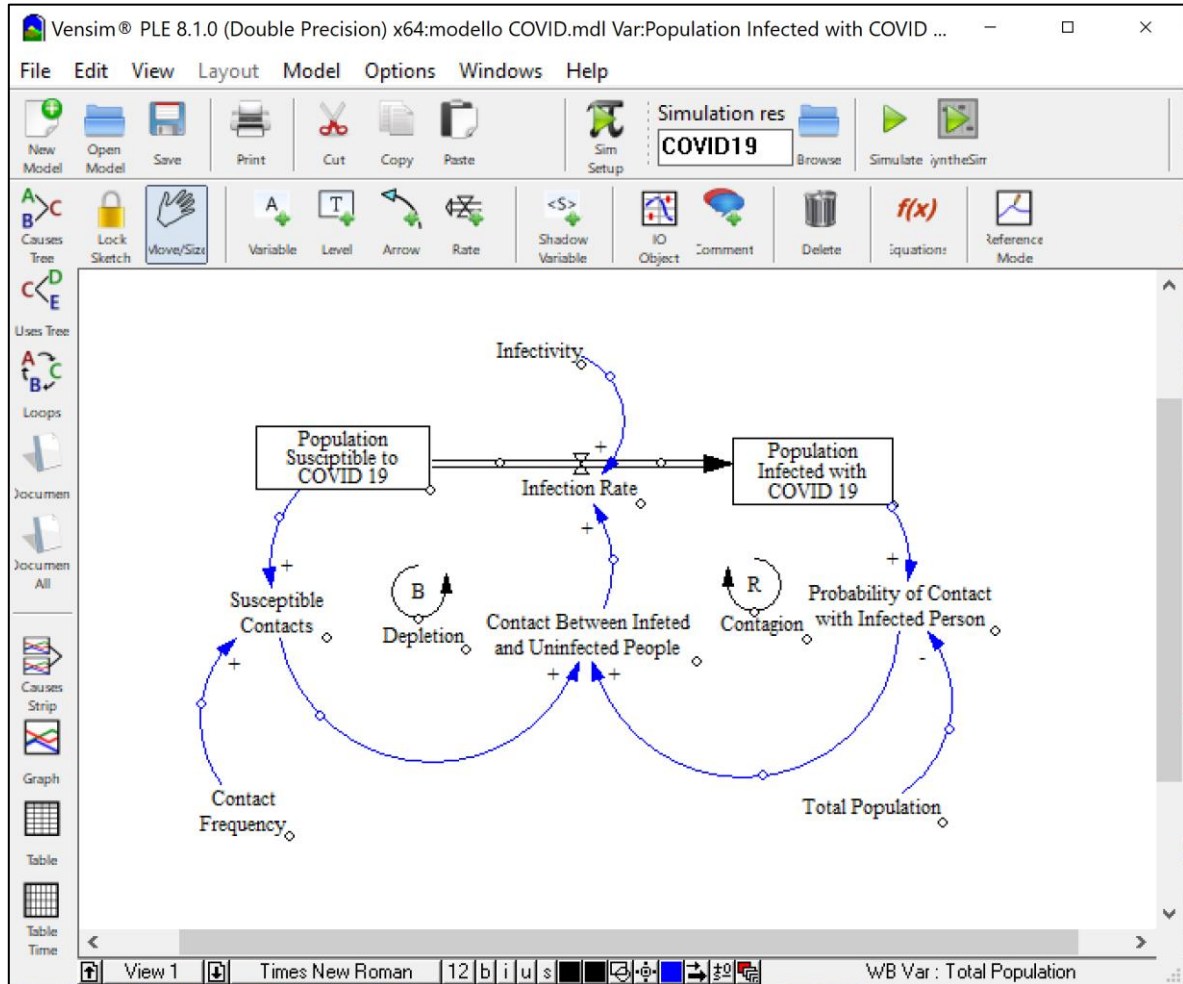
*Figura 24: Interfaccia grafica di VensimPLE raffigurante gli stock, il flow e alcune variabili ausiliarie*

A tale proposito, le due variabili ausiliare vengono collegate all'**Infection Rate** tramite frecce casuali, entrambe con polarità positiva atta ad evidenziare la natura diretta delle connessioni. Dunque, al fine di rendere completo il CDL creato, si è proceduto con l'inserimento di ulteriori variabili quali:

- **Probability of Contact with Infected Person**, che rappresenta la probabilità di entrare in contatto con una persona infetta;
- **Total Population**, che raffigura la popolazione totale di un determinato Paese preso in considerazione;
- La frequenza dei contatti tra individui, la **Contact Frequency**, che può essere modulata in base alle misure restrittive adottate;
- **Susceptible Contacts**, che considera i contatti tra persone non infette.

A scopo puramente chiarificatorio e per rendere maggiormente immediata la comprensione del modello creato, si sono aggiunte le etichette relative alla tipologia di loop considerato: si è

introdotta la **B**, insieme al commento *Depletion*, per indicare il loop di bilanciamento, mentre la lettera **R**, correlata al commento *Contagion*, per raffigurare il loop positivo di crescita dei contagi.



*Figura 25: Interfaccia grafica che mostra il modello in costruzione*

Sviluppata completamente la rappresentazione dei feedback, degli stock e del flow per la pandemia COVID-19, risulta ora necessario specificare le equazioni delle variabili. Al fine di costruire un modello SD applicato alla teoria di diffusione di Bass è stato necessario andare a comprenderne l'equazioni 1.14 e 1.15 (riportate al paragrafo 1.3.5), in modo da riuscire a convertirle in una versione compatibile all'approccio utilizzato. In tal senso, partendo dall'analisi dell'equazione 1.14 alla base del modello di Bass, si ricorda come questa presenti nella sua formulazione i parametri di adozione  $p$  e  $q$ , rispettivamente coefficiente innovativo e imitativo. A tale proposito, sono state fatte due importanti assunzioni: la prima è stata considerare l'**Infectivity** rappresentata dal coefficiente innovativo  $p$  di influenza esterna e, la

seconda assumere che il coefficiente imitativo  $q$ , fondato sul passaparola e sulla rete interpersonale, esprima la **Contact Frequency**.

Tali assunzioni sono state quindi supportate dall'equazioni assegnate alle variabili del modello e sotto riportate:

$$\textbf{Infection Rate} = \text{Contact Between Infected and Uninfected People} * \text{Infectivity} \quad (3.1)$$

$$\textbf{Population Susceptible to COVID 19} = -\text{Infection Rate} \quad (3.2)$$

$$\textbf{Population Infected with COVID 19} = \text{Infection Rate} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \textbf{Probability of Contact with Infected Person} \\ = \text{Population Infected with COVID19/Total Population} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \textbf{Contact Between Infected and Uninfected People} \\ = \text{Susceptible Contacts} \\ * \text{Probability of Contact with Infected Person} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\textbf{Susceptible Contacts} = \text{Population Susceptible to COVID 19} * \text{Contact Frequency} \quad (3.6)$$

I parametri **Infectivity**, **Contact Frequency** e **Total Population** non presentano equazioni in quanto assumono valori costanti e si andranno a calibrare in modo specifico per ogni Paese selezionato, come esposto al paragrafo 3.2.

Si è manifestato dunque necessario andare ad assegnare le unità di misura proprie di ogni variabile, identificate come segue:

**Infection Rate:** Persone/Giorno

**Contact Frequency:** Persone/Giorno

**Infectivity:** adimensionale

**Population Infected with COVID-19:** Persone

**Population Susceptible with COVID-19:** Persone

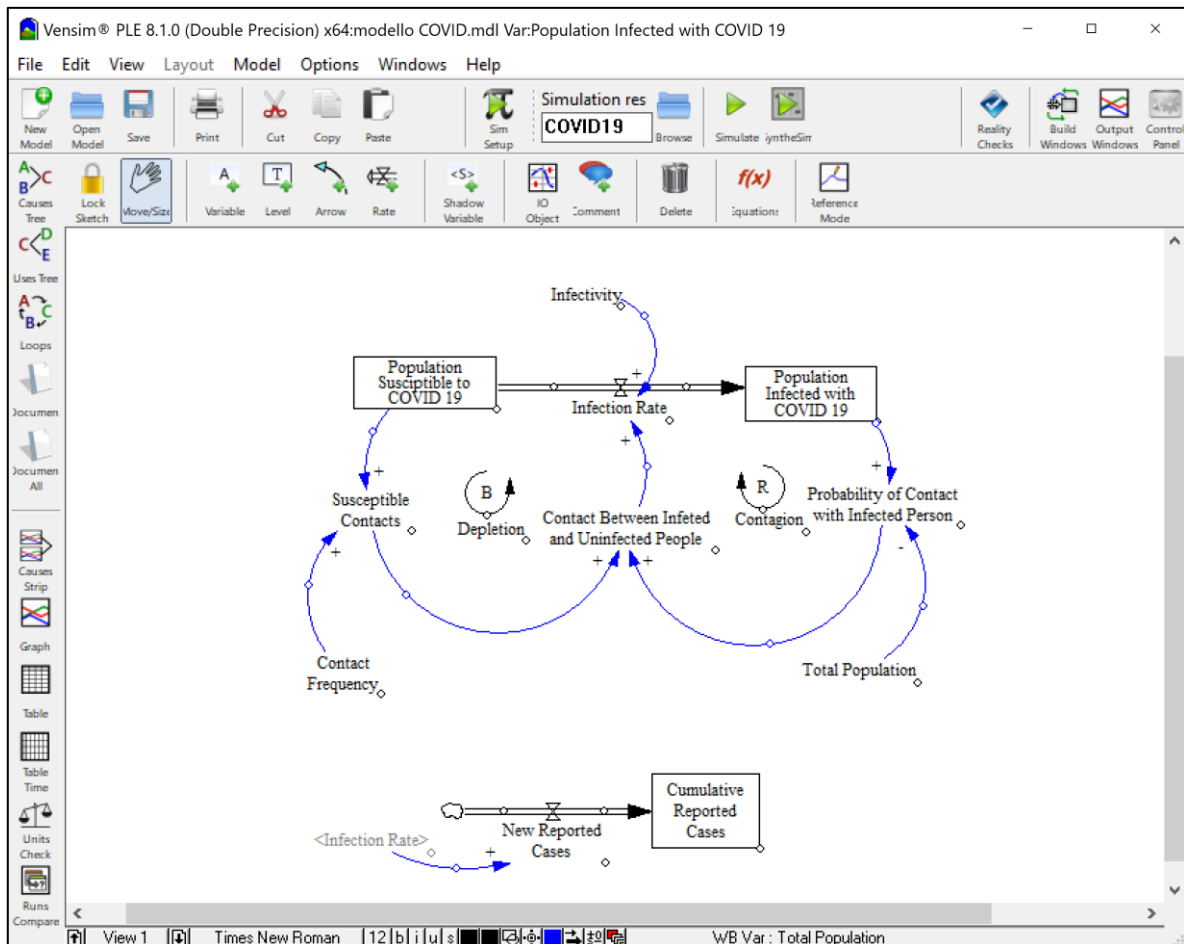
**Probability of Contact with Infected Person:** adimensionale

**Contact Between Infected and Uninfected Person:** Persone/Giorno

**Susceptible Contacts:** Persone/Giorno

**Total Population:** Persone

A scopo semplificativo e per consentire il confronto tra i dati restituiti dal modello e i dati reali del dataset creato, si è ritenuto opportuno introdurre uno stock denominato **Cumulative Reported Cases**, nel quale viene tenuta traccia del numero cumulado di casi positivi al COVID-19 nel tempo, come si nota dalla *Figura 26*.



*Figura 26: Interfaccia grafica raffigurante il modello COVID-19 terminato*

Tale stock è stato connesso al flusso **New Reported Cases**, che è stato posto uguale all'**Infection Rate** in quanto deve svolgere la sua stessa funzione. A tale fine è stata creata una variabile ombra (shadow variable), preferibile alla freccia casuale in quanto in grado di mantenere i diagrammi del modello più puliti e leggibili. Lo stock **Cumulative Reported Cases** risulta dunque definito come l'integrale di **New Reported Cases** e mostrerà il medesimo livello riportato dallo stock **Population Infected with COVID-19**, avendo assunto i rispetti flow identici. Nonostante ciò, la sua introduzione nel modello non risulta superflua in quanto concettualmente differiscono, infatti se venissero apportate modifiche alla struttura del modello

con il fine di introdurre il numero di individui guariti o deceduti, l'equivalenza tra i due stock non sarebbe più rispettata.

### 3.2 Adattamento del modello SD ai casi di Spagna, Francia, Germania e USA

Descritto il modello SD base rappresentante la diffusione del COVID-19, risulta ora necessario andare ad adattarlo per rispecchiare in maniera più appropriata i diversi casi di studio selezionati: Spagna, Francia, Germania e Stati Uniti d'America. Questi Paesi sono stati scelti in quanto rappresentano le due macroaree più violentemente colpite dal virus a livello globale, identificate infatti nelle Americhe e nell'Europa, come esposto in dettaglio al paragrafo 2.2. Nello specifico, si sono scelti Spagna, Francia e Germania in rappresentanza del continente europeo con l'obiettivo di costituire un gruppo di Paesi, in grado di raffigurare differenti realtà all'interno dello stesso continente ma accumulati dall'alto numero di contagi che li ha contraddistinti. Inoltre, nel tentativo di svolgere uno studio internazionale, si è arrivati alla conclusione di non considerare il caso italiano. D'altro lato, per il continente americano, sono stati selezionati gli USA poiché il Paese maggiormente colpito oltre ad essere quello di riferimento per dimensioni ed importanza.

#### 3.2.1 Variabili da adattare ai modelli SD

Al fine di rispecchiare in modo più accurato l'andamento dei contagi nei differenti Paesi, è stato necessario adattare il parametro **Total Population** con il numero totale della popolazione in esame ed inoltre stimare per ogni Stato il rispettivo valore da assegnare all'**Infectivity** e alla **Contact Frequency**. Per quanto riguarda l'infettività, si è ritenuto opportuno assumerla uguale alla percentuale degli individui infetti, mediante la relazione 3.7:

$$\text{Infectivity} = \frac{\text{Numero di contagi cumulati}}{\text{Totale della popolazione}} \quad (3.7)$$

Volendo in aggiunta inserire nel modello SD diversi valori di infettività nel tempo, al fine di poter rappresentare in modo più appropriato l'andamento dei contagi contenuto nel dataset, si è introdotta nell'equazione dell'**Infectivity** la funzione PULSE. Tale funzione è infatti in grado di restituire differenti valori nel tempo se moltiplicata per fattori pari all'intensità degli impulsi desiderati. Il suo utilizzo risulta piuttosto semplice, infatti è sufficiente inserire come input il time step di partenza e la durata per la quale deve restituire tale valore. Così facendo si è stati capaci di rappresentare il parametro d'infettività settimanale, modificandone il

valore ogni 7 giorni. Tali impulsi sono stati estrapolati dal dataset per ciascun Paese, come riportato in *Allegato 2*.

Un simile discorso riguarda la **Contact Frequency**, il quale valore viene anch'esso assegnato settimanalmente attraverso la funzione PULSE, calibrando così il modello SD già completo degli altri input necessari. In aggiunta, risulta fondamentale andare ad impostare l'orizzonte temporale di ogni Paese, per adeguare la durata dell'andamento simulato a quella reale dei dati registrati nel dataset.

### 3.2.2 Calibrazione del modello SD per l'applicazione ai casi di studio.

Nella seguente sezione si andranno a mostrare i diversi adattamenti apportati al modello SD finora descritto, al fine di crearne uno specifico per ogni Paese selezionato.

Il primo modello creato è stato quello relativo all'andamento dei contagi in Spagna, simulati modificando i parametri descritti al paragrafo 3.2.1 e andando in primis a sostituire il valore della **Total Population** con il numero totale di abitanti della Spagna (46.94 M), come si evince dalla *Figura 27*. Successivamente si è proseguito inserendo i valori dell'**Infectivity** ricavati dal dataset, osservabili in *Figura 28*, concludendo con la calibrazione della **Contact Frequency** riportata in *Figura 29*. Da quest'ultima si può notare la presenza di impulsi considerati molto alti e ciò potrebbe essere riconducibile all'elevata attitudine alla socializzazione tipica della popolazione spagnola. Inoltre, risultano elevati anche gli ultimi valori attribuiti alla variabile **Infectivity** e questo potrebbe essere imputabile alla decisione del governo spagnolo di rendere obbligatori i dispositivi di protezione individuali solamente ad inizio giugno. Pertanto, l'aumento di questi due parametri ha portato la Spagna a raggiungere gli alti valori rappresentati in *Figura 30*. Inoltre, risulta importante specificare l'orizzonte temporale di simulazione assunto, che si estende dal 03/02/2020 al 1/06/2020, per un totale di 120 giorni.



Edit: Total Population

Variable Information

Name: Total Population

Type: Constant Sub-Type: Normal

Units: People Check Units Supplementary

Group: .pulse Min Max Incr

Equations: 4.694e+07

Comment: Total population in this model is set to the total number of population in Spain.

Errors: Equation Modified

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 27: Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale di popolazione spagnola

Edit: Infectivity

Variable Information

Name: Infectivity

Type: Auxiliary Sub-Type: Normal

Units: Dn1 Check Units Supplementary

Group: .pulse Min Max

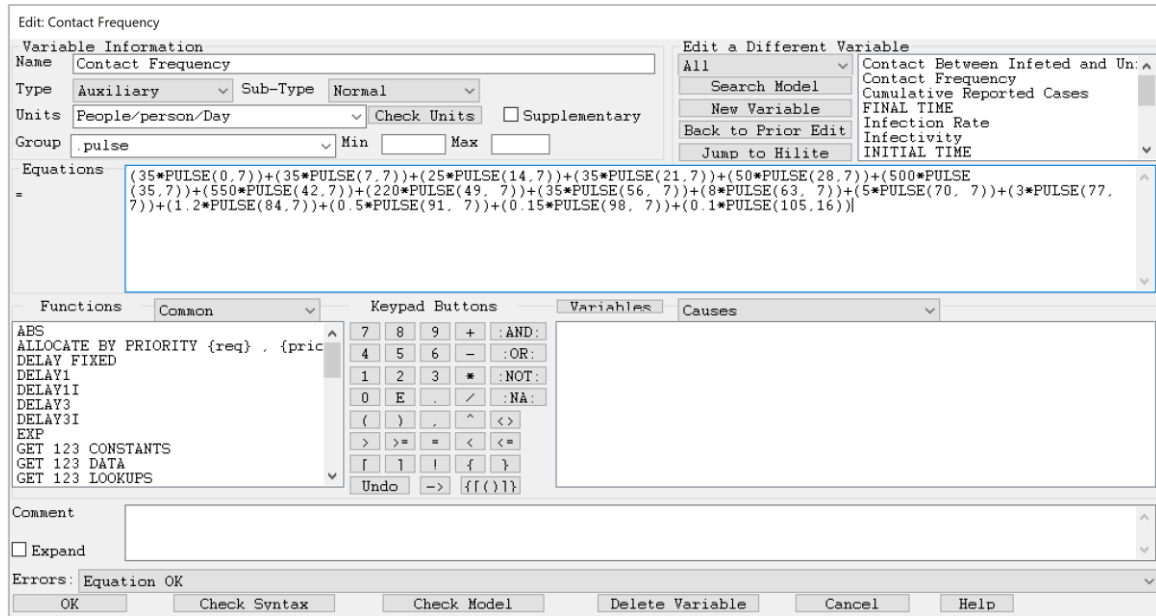
Equations: 
$$(0 * \text{PULSE}(0, 7)) + (0 * \text{PULSE}(7, 7)) + (1e-06 * \text{PULSE}(14, 7)) + (9e-06 * \text{PULSE}(22, 7)) + (0.000123 * \text{PULSE}(28, 7)) + (0.000531 * \text{PULSE}(35, 7)) + (0.001539 * \text{PULSE}(42, 7)) + (0.002657 * \text{PULSE}(49, 7)) + (0.003448 * \text{PULSE}(56, 7)) + (0.004084 * \text{PULSE}(63, 7)) + (0.004882 * \text{PULSE}(70, 7)) + (0.004872 * \text{PULSE}(77, 7)) + (0.005021 * \text{PULSE}(84, 7)) + (0.005173 * \text{PULSE}(91, 7)) + (0.005271 * \text{PULSE}(98, 7)) + (0.005371 * \text{PULSE}(105, 16))$$

Comment:

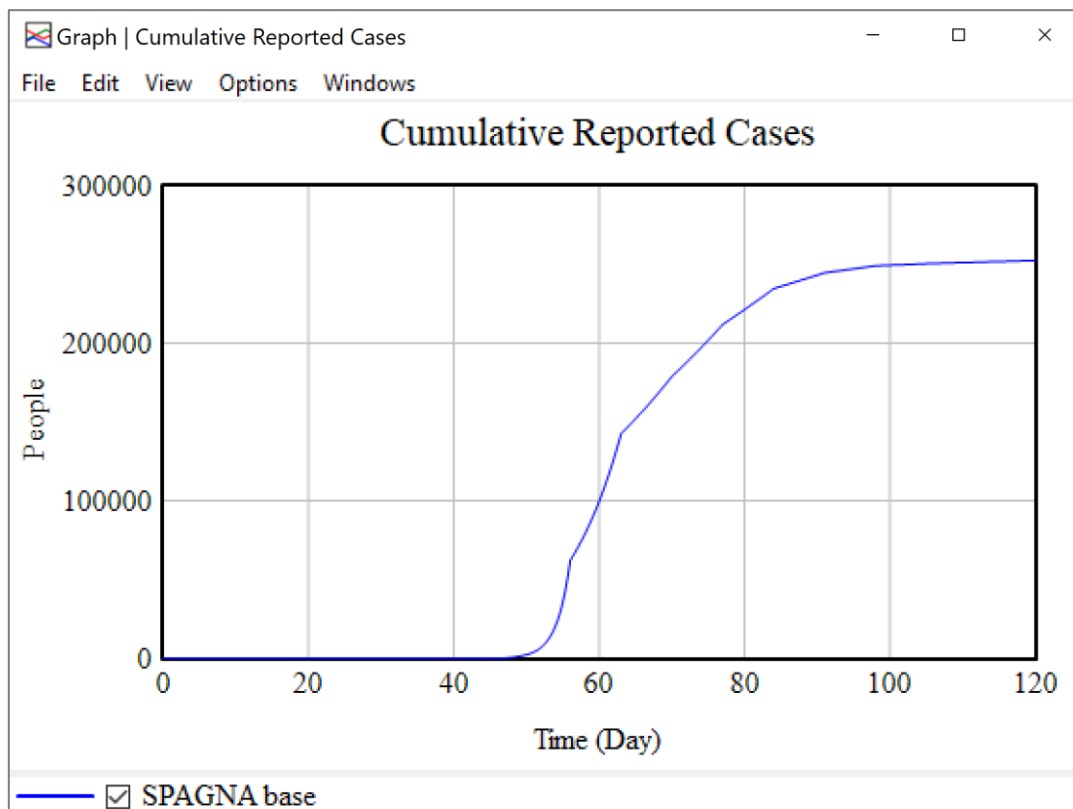
Errors: Equation OK

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 28: Interfaccia grafica per l'inserimento dei diversi impulsi settimanali nel caso spagnolo



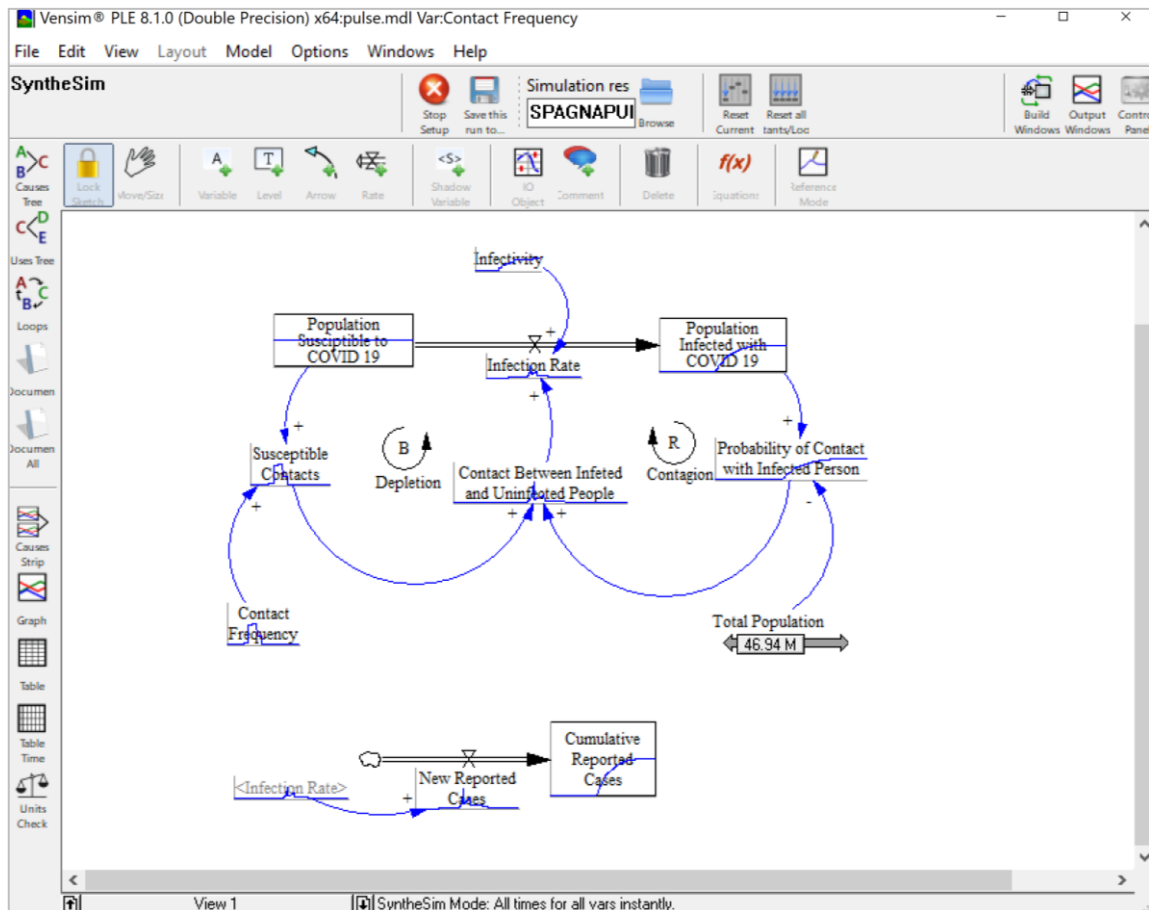
**Figura 29:** Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori desiderati di frequenza dei contatti in Spagna.



**Figura 30:** Grafico che rappresenta l'andamento simulato del caso Spagna

In Figura 31 è riportata la tipologia di simulazione *SyntheSim*, offerta da *VensimPLE*, che restituisce una panoramica generale degli andamenti delle variabili e degli stock del modello SD della Spagna. Tale strumento inoltre consente la modifica dei parametri, andando a ri-

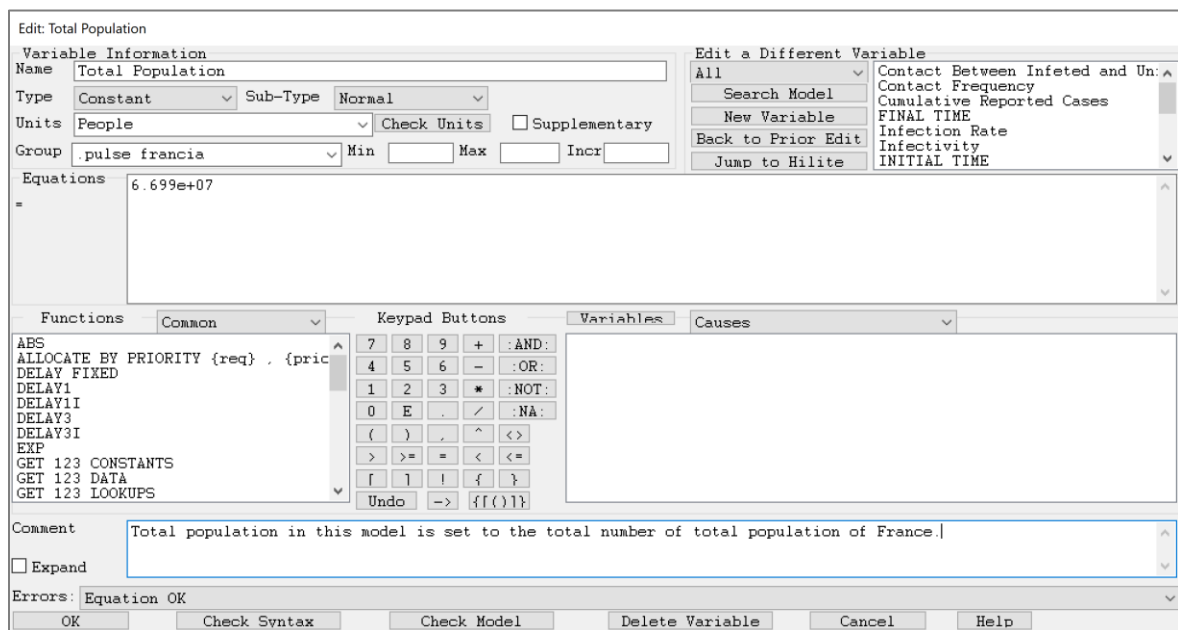
simulare automaticamente e nell'immediato gli output generati, cosa possibile solo per la **Total Population** nel caso in esame, in quanto costituisce l'unica variabile costante del modello. Tale procedura è ora descritta a scopo esemplificativo e non verrà riproposta per i Paesi analizzati successivamente.



**Figura 31:** Interfaccia grafica che mostra il modello SD Spagna simulato con SyntheSim

Analogamente a quanto condotto per la calibrazione del modello SD della Spagna, anche per Francia, Germania e USA si è andati a sostituire i relativi valori di **Total Population**, **Infectivity** e **Contact Frequency**, riportando gli adattamenti stimati nelle figure seguenti. Nel caso della Francia l'orizzonte temporale di simulazione assunto è di 126 giorni, ossia 18 settimane, a partire dal 27/01/2020 fino al 31/05/2020. Come visibile dalla *Figura 32*, il totale della popolazione francese ammonta a 66.99 M, valore maggiore rispetto al numero di abitanti spagnoli, mentre dall'osservazione della *Figura 33* si constata come i livelli di **Infectivity** stimati risultino invece essere inferiori. Questo comporta un numero di contagiati presenti all'interno dei confini francesi minore rispetto al caso spagnolo. A tal proposito, si nota in *Figura 34* come anche i valori riportati dalla variabile **Contact**

**Frequency** siano più contenuti. Tuttavia, questo Paese rimane tra i primi a livello europeo per numero di contagi e la causa potrebbe risiedere nella sottovalutazione della situazione, che ha portato il governo ad imporre il *lockdown* quasi dieci giorni dopo la comparsa del primo caso. Inoltre si sono riscontrati problemi anche dal punto di vista organizzativo, soprattutto nella gestione sanitaria, che ha mostrato una mancanza di sufficienti dispositivi di protezione individuale e test per la popolazione francese, comportando, come si evince dalla *Figura 35*, un alto numero di individui contagiati.



**Figura 32:** Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale della popolazione francese

Edit: Infectivity

Variable Information  
Name: Infectivity  
Type: Auxiliary Sub-Type: Normal  
Units: Dnml Check Units ☐ Supplementary  
Group: pulse francia Min: Max:

Equations  
= (0\*PULSE(0,7))+(0\*PULSE(7,7))+(0\*PULSE(14,7))+(0\*PULSE(22,7))+(1e-06\*PULSE(28,7))+(1.1e-05\*PULSE(35,7))+(6.7e-05\*PULSE(42,7))+(0.000213\*PULSE(49,7))+(0.000554\*PULSE(56,7))+(0.001011\*PULSE(63,7))+(0.001385\*PULSE(70,7))+(0.001653\*PULSE(77,7))+(0.001834\*PULSE(84,7))+(0.001932\*PULSE(91,7))+(0.002045\*PULSE(98,7))+(0.00209\*PULSE(105,7))+(0.002122\*PULSE(112,7))+(0.002216\*PULSE(119,8))

Functions: Common Keypad Buttons Variables Causes

Comment  
☐ Expand

Errors: Equation OK

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 33: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori attribuiti all'Infectivity della Francia

Edit: Contact Frequency

Variable Information  
Name: Contact Frequency  
Type: Auxiliary Sub-Type: Normal  
Units: People/person/Day Check Units ☐ Supplementary  
Group: pulse francia Min: Max:

Equations  
= (5\*PULSE(0,7))+(4\*PULSE(7,7))+(5\*PULSE(14,7))+(10\*PULSE(21,7))+(15\*PULSE(28,7))+(45\*PULSE(35,7))+(45\*PULSE(42,7))+(55\*PULSE(49,7))+(50\*PULSE(56,7))+(25\*PULSE(63,7))+(55\*PULSE(70,7))+(20\*PULSE(77,7))+(50\*PULSE(84,7))+(16.8\*PULSE(91,7))+(8\*PULSE(98,7))+(4\*PULSE(105,7))+(3\*PULSE(112,7))+(2\*PULSE(119,7))

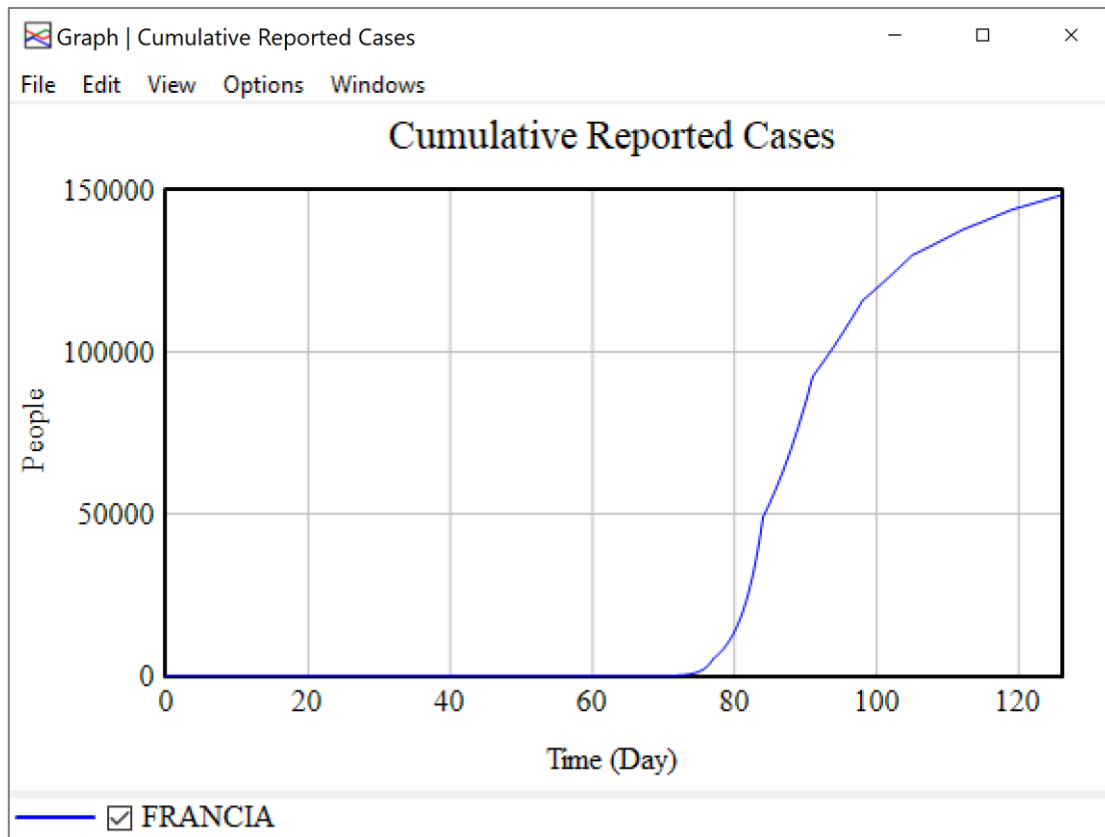
Functions: Common Keypad Buttons Variables Causes

Comment  
☐ Expand

Errors: Equation Modified

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

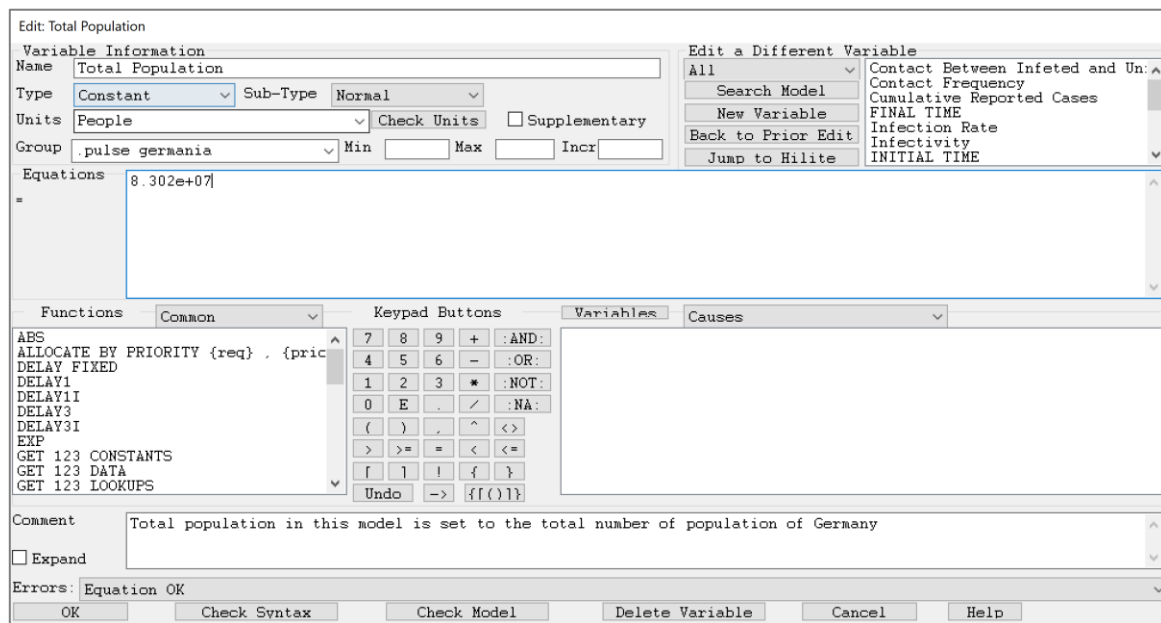
Figura 34: Interfaccia grafica per la calibrazione dei valori da assegnare alla Contact Frequency nel caso Francia



*Figura 35: Grafico che rappresenta l'andamento simulato del caso Francia*

Per quanto riguarda la Germania l'orizzonte temporale di simulazione del modello SD creato, si estende dal 02/02/2020 al 31/05/2020, per un totale di 120 giorni. In *Figura 36* si riporta l'interfaccia grafica, visibile dal modellista, per l'inserimento del numero totale della popolazione tedesca (83.02 M), seguita dalle *Figure 37* e *38*, relative all'assegnazione degli impulsi dell'**Infectivity** e della **Contact Frequency**. Risalta all'occhio come la popolazione tedesca, pur essendo più numerosa della Spagna e della Francia, sia stata capace di controllare la diffusione del COVID-19, riportando infatti valori d'infettività del virus minori e quindi in proporzione un numero di contagi più ristretto. Questo potrebbe essere dovuto all'elevato numero di test elargiti dalla nazione, che essendo investita dall'epidemia con un ritardo di un mese rispetto a nazioni come l'Italia, ha avuto il modo di prepararsi e limitare gli errori. Infatti, la Germania a marzo ha effettuato 160.000 test a settimana, saliti a 400.000 a maggio, ciò correlato all'elevata efficienza dei tracciatori ha reso possibile l'individuazione degli individui infetti e l'immediato contenimento della diffusione [19]. Inoltre, dal grafico in *Figura 39* raffigurante la simulazione dell'andamento reale della Germania, è possibile notare come l'output cresca proporzionalmente meno rapidamente rispetto a quello della Francia e della Spagna e ciò potrebbe essere correlato alla strategia comunicativa adottata dal Paese. Infatti, le

decisioni prese dalle autorità competenti sono state comunicate in modo totalmente diverso, utilizzando un linguaggio preciso, scientifico, grave ma al contempo non allarmista, che potrebbe aver incentivato la popolazione tedesca ad assumere un comportamento adeguato al contenimento della pandemia. A tal proposito, si potrebbe considerare rilevante anche la differenza socioculturale dei diversi Paesi esaminati, infatti il popolo tedesco si contraddistingue per la precisione e per il rigore nel rispettare le regole, pertanto il basso livello di contagiati proprio del Paese potrebbe essere ricondotto anche ad una maggiore diligenza nel seguire le normative igienico-sanitarie imposte dal governo.



**Figura 36:** Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale della popolazione tedesca

Edit Infectivity

Variable Information

Name: Infectivity

Type: Auxiliary Sub-Type: Normal

Units: Dn1 Check Units Supplementary

Group: pulse germania Min Max

Equations

$$(0 \cdot \text{PULSE}(0, 7)) + (0 \cdot \text{PULSE}(7, 7)) + (0 \cdot \text{PULSE}(14, 7)) + (1e-06 \cdot \text{PULSE}(22, 7)) + (8e-06 \cdot \text{PULSE}(28, 7)) + (3.7e-05 \cdot \text{PULSE}(35, 7)) + (0.000221 \cdot \text{PULSE}(42, 7)) + (0.000585 \cdot \text{PULSE}(49, 7)) + (0.001033 \cdot \text{PULSE}(56, 7)) + (0.001417 \cdot \text{PULSE}(63, 7)) + (0.001655 \cdot \text{PULSE}(70, 7)) + (0.001836 \cdot \text{PULSE}(77, 7)) + (0.001948 \cdot \text{PULSE}(84, 7)) + (0.00203 \cdot \text{PULSE}(91, 7)) + (0.002093 \cdot \text{PULSE}(98, 7)) + (0.002142 \cdot \text{PULSE}(105, 7)) + (0.002183 \cdot \text{PULSE}(112, 7)) + (0.002186 \cdot \text{PULSE}(119, 2))$$

Functions: Common Keypad Buttons Variables Causes

ABS  
ALLOCATE BY PRIORITY {req} . {prio}  
DELAY FIXED  
DELAY1  
DELAY1I  
DELAY3  
DELAY3I  
EXP  
GET 123 CONSTANTS  
GET 123 DATA  
GET 123 LOOKUPS

Comment

Expand

Errors: Equation OK

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 37: Interfaccia grafica per l'inserimento degli impulsi stimati di infettività nel caso della Germania

Edit Contact Frequency

Variable Information

Name: Contact Frequency

Type: Auxiliary Sub-Type: Normal

Units: People/person/Day Check Units Supplementary

Group: pulse germania Min Max

Equations

$$(5 \cdot \text{PULSE}(0, 7)) + (4 \cdot \text{PULSE}(7, 7)) + (5 \cdot \text{PULSE}(14, 7)) + (10 \cdot \text{PULSE}(21, 7)) + (15 \cdot \text{PULSE}(28, 7)) + (45 \cdot \text{PULSE}(35, 7)) + (45 \cdot \text{PULSE}(42, 7)) + (45 \cdot \text{PULSE}(49, 7)) + (58 \cdot \text{PULSE}(56, 7)) + (50 \cdot \text{PULSE}(63, 7)) + (55 \cdot \text{PULSE}(70, 7)) + (20 \cdot \text{PULSE}(77, 7)) + (51 \cdot \text{PULSE}(84, 7)) + (15 \cdot \text{PULSE}(91, 7)) + (8 \cdot \text{PULSE}(98, 7)) + (4 \cdot \text{PULSE}(105, 7)) + (3 \cdot \text{PULSE}(112, 7)) + (2 \cdot \text{PULSE}(119, 7))$$

Functions: Common Keypad Buttons Variables Causes

ABS  
ALLOCATE BY PRIORITY {req} . {prio}  
DELAY FIXED  
DELAY1  
DELAY1I  
DELAY3  
DELAY3I  
EXP  
GET 123 CONSTANTS  
GET 123 DATA  
GET 123 LOOKUPS

Comment

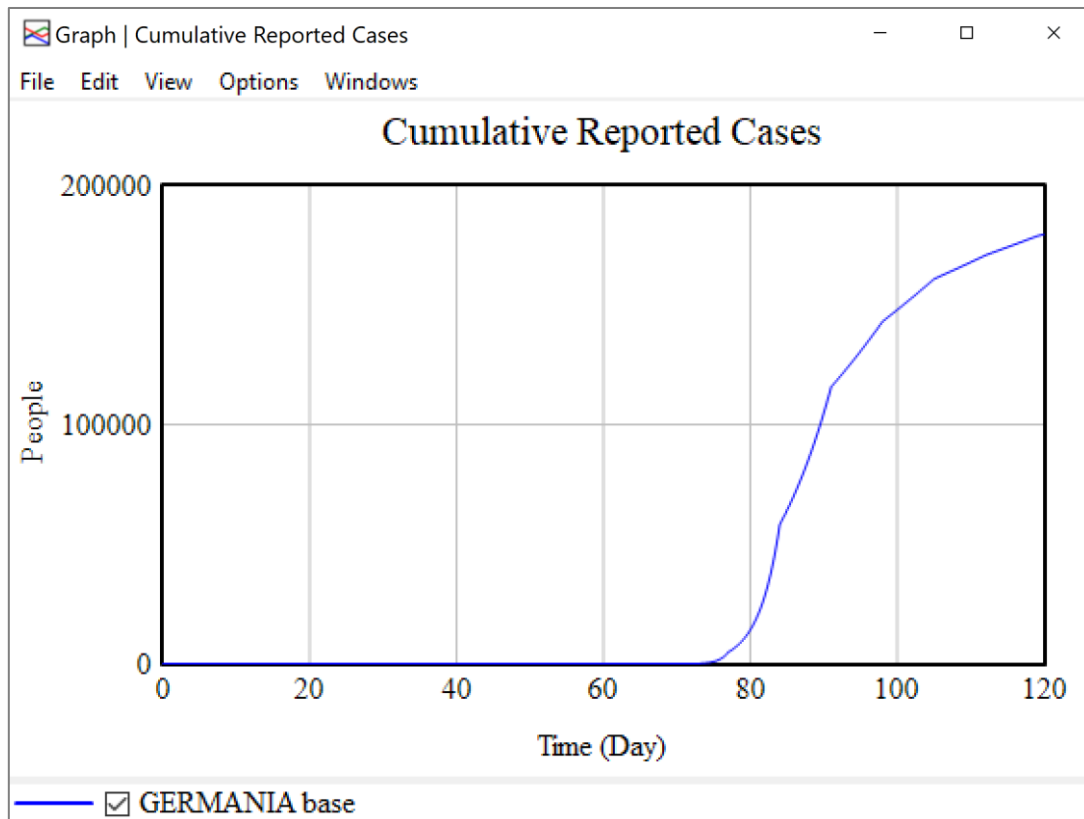
Expand

Errors: Equation Modified

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 38: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori da assegnare alla Contact Frequency nel caso della Germania





**Figura 39:** Grafico che rappresenta l'andamento simulato del caso Germania

Nel caso degli USA, l'orizzonte temporale di simulazione idoneo è stato ritenuto di 18 settimane, congruentemente a quanto registrato nel dataset, estendendosi dal 27/01/2020 a 31/05/2020. La popolazione americana risulta essere ampiamente superiore a quella degli altri Paesi considerati, arrivando a circa 382.2 M di abitanti, come riportato in *Figura 40*. Inoltre, viene stimato un tasso di infettività elevato, riscontrabile in *Figura 41*. Come già esposto nel dettaglio al paragrafo 2.2. il caso degli Stati Uniti d'America è risultato essere il più preoccupante a livello mondiale per la sua rapidità di diffusione, probabilmente imputabile ai poco rigidi provvedimenti adottati dalle autorità competenti per limitare i contatti nella società. Inoltre, l'alto livello di casi confermati in questo Paese potrebbe essere causato dall'indifferenza e dalla sottovalutazione generale del problema che ha caratterizzato la popolazione americana, probabilmente generata dal tipo di comunicazione adottato dalla presidenza vigente e dalle istituzioni, che minimizzavano il problema, rassicurando i cittadini. Così facendo non vi è stata la possibilità di comprendere la reale gravità della situazione, permettendo quindi al virus di diffondersi molto più velocemente, come mostrato in *Figura 43*.

Edit: Total Population

Variable Information

Name: Total Population

Type: Constant Sub-Type: Normal

Units: People Check Units ☐ Supplementary

Group: .pulse stati uniti Min: Max: Incr:

Equations: 3.282e+08

Functions: Common Keypad Buttons Variables Causes

ABS  
ALLOCATE BY PRIORITY {req} . {prio  
DELAY FIXED  
DELAY1  
DELAY11  
DELAY3  
DELAY31  
EXP  
GET 123 CONSTANTS  
GET 123 DATA  
GET 123 LOOKUPS

Keypad Buttons: 7 8 9 + :AND:  
4 5 6 - :OR:  
1 2 3 \* :NOT:  
0 E . / :NA:  
{ } , ^ <>  
> >= = < <=  
[ ] ! { }  
Undo -> {{ }}

Comment: Total population in this model is set to the total number of population of USA

☐ Expand

Errors: Equation OK

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 40: Interfaccia grafica per l'inserimento del numero totale di abitanti degli USA

Edit: Infectivity

Variable Information

Name: Infectivity

Type: Auxiliary Sub-Type: Normal

Units: Dnnl Check Units ☐ Supplementary

Group: .pulse stati uniti Min: Max:

Equations: (0\*PULSE(0,7))+(0\*PULSE(7,7))+(0\*PULSE(14,7))+(1e-05\*PULSE(22,7))+(1e-05\*PULSE(28,7))+(2e-05\*PULSE(35,7))+(4e-05\*PULSE(42,7))+(5e-05\*PULSE(49,7))+(0.00071\*PULSE(56,7))+(0.00083\*PULSE(63,7))+(0.0015\*PULSE(70,7))+(0.00212\*PULSE(77,7))+(0.00274\*PULSE(84,7))+(0.00333\*PULSE(91,7))+(0.00383\*PULSE(98,7))+(0.00429\*PULSE(105,7))+(0.00478\*PULSE(112,7))+(0.00523\*PULSE(119,7))

Functions: Common Keypad Buttons Variables Causes

ABS  
ALLOCATE BY PRIORITY {req} . {prio  
DELAY FIXED  
DELAY1  
DELAY11  
DELAY3  
DELAY31  
EXP  
GET 123 CONSTANTS  
GET 123 DATA  
GET 123 LOOKUPS

Keypad Buttons: 7 8 9 + :AND:  
4 5 6 - :OR:  
1 2 3 \* :NOT:  
0 E . / :NA:  
{ } , ^ <>  
> >= = < <=  
[ ] ! { }  
Undo -> {{ }}

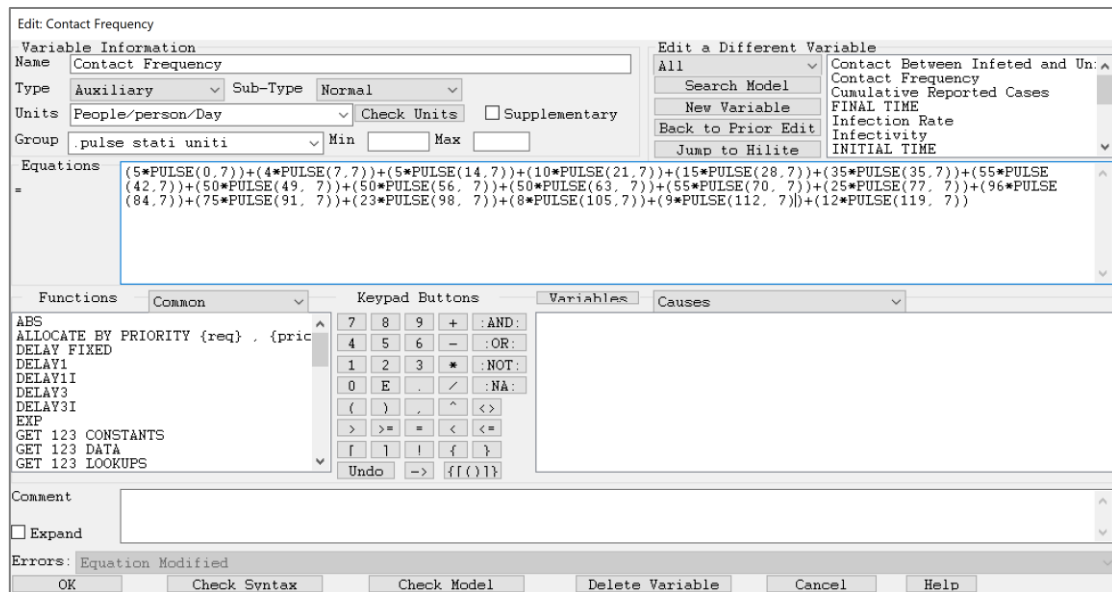
Comment:

☐ Expand

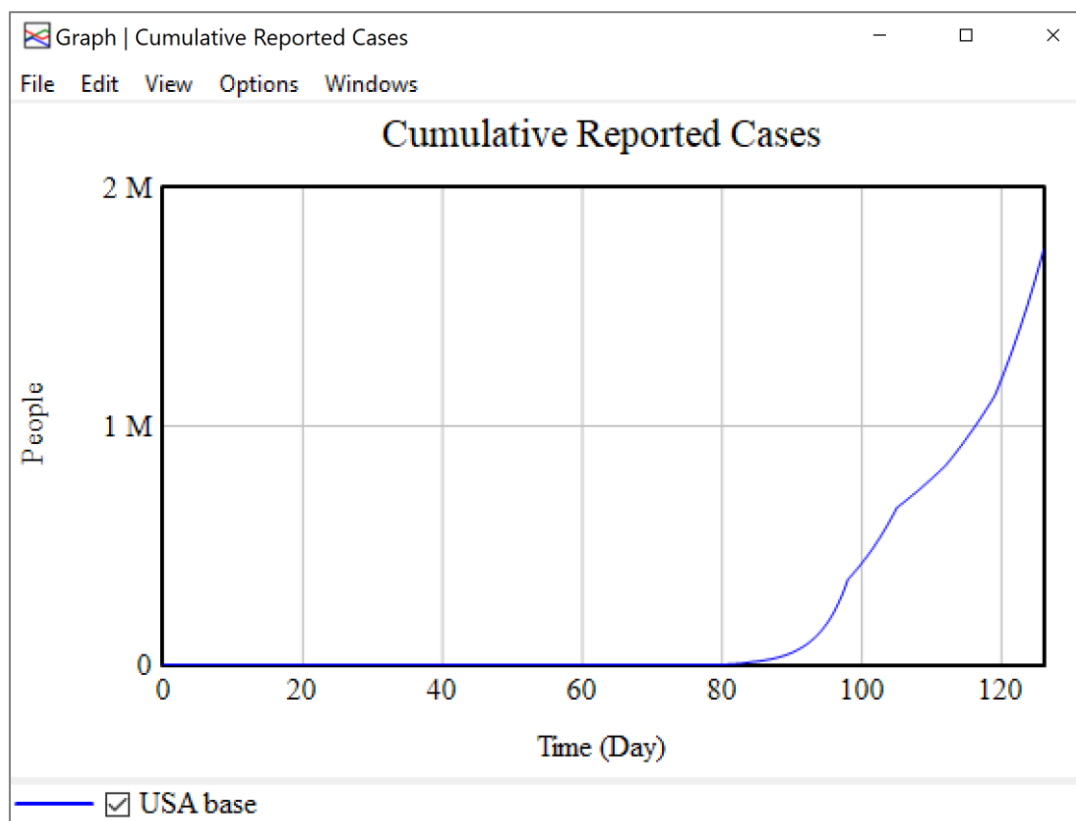
Errors: Equation OK

OK Check Syntax Check Model Delete Variable Cancel Help

Figura 41: Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori stimati dell'infettività nel caso degli Stati Uniti

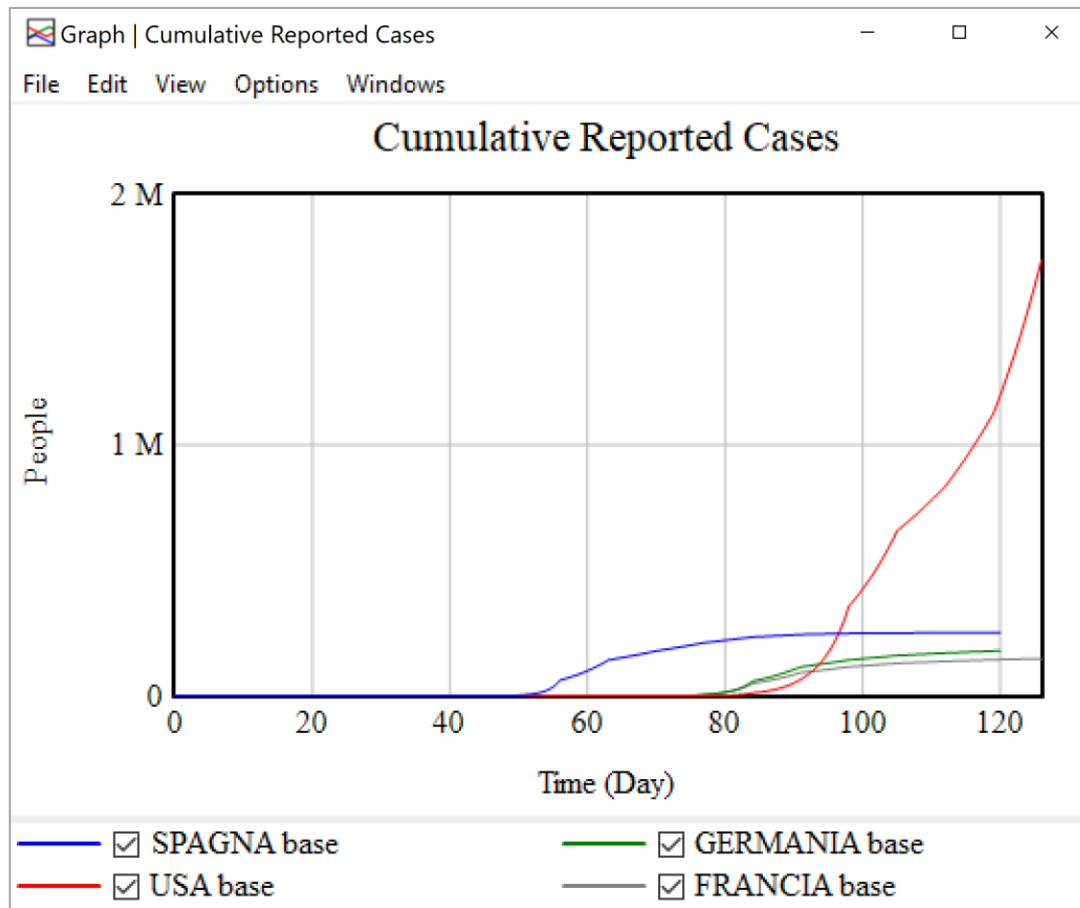


**Figura 42:** Interfaccia grafica per l'inserimento dei valori da assegnare alla Contact Frequency nel caso degli USA



**Figura 43:** Grafico che rappresenta l'andamento simulato degli USA

Dalla simulazione dei quattro modelli SD base creati per ogni Paese, è possibile ricavare il grafico in *Figura 44*, che mostra i differenti andamenti registrati a confronto.



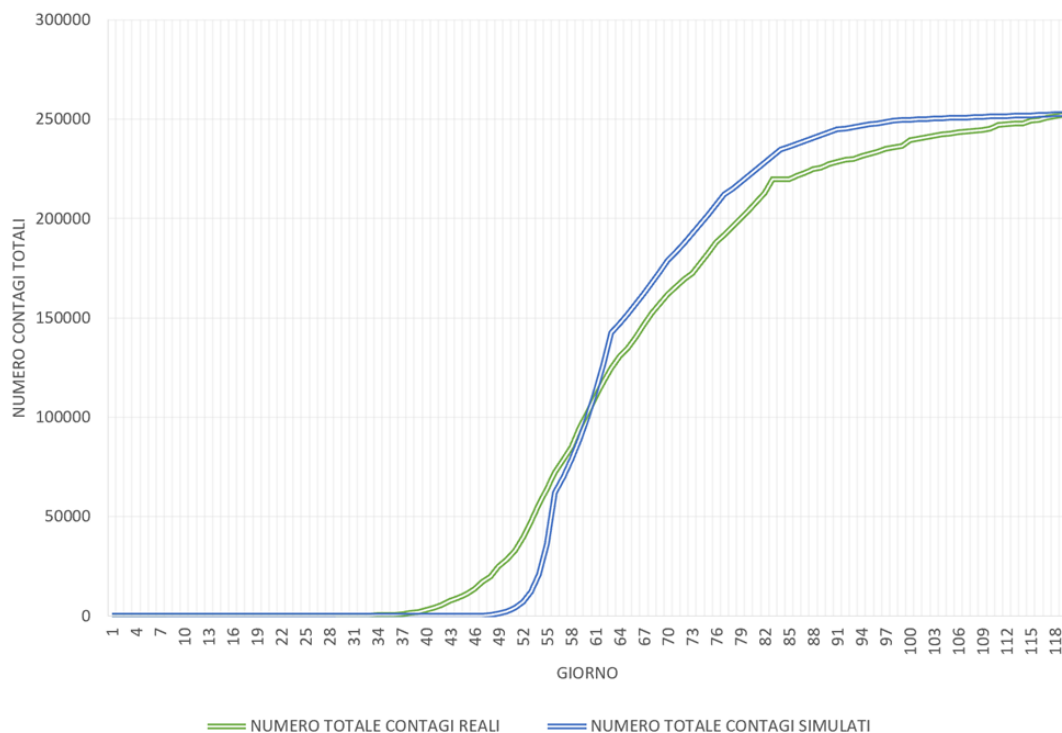
**Figura 44:** Grafico che rappresenta il numero di casi cumulati per i diversi Paesi in esame, ottenuti con la simulazione dei rispettivi modelli SD

Un aspetto che potrebbe essere ritenuto parzialmente responsabile del divario emerso tra l'Europa e l'America potrebbe risiedere nella differente gestione sanitaria tipica dei due continenti. Infatti l'Europa presenta un sistema sanitario prettamente pubblico o misto, mentre l'America assicurativo privatistico. Nel caso americano, dunque, non esiste l'obbligo di rango costituzionale a rendere fruibile per tutta la popolazione l'accesso alle cure, motivo per cui il numero di contagi potrebbe crescere esponenzialmente se la popolazione, per ragioni legate al reddito o alla classe sociale, esitasse a richiedere assistenza o a rispettare le misure di salute pubblica necessarie. Nel caso dell'Europa, invece, la maggior parte degli Stati presenta servizi sanitari nazionali, come nel caso italiano, o semipubblici, come nel caso tedesco, basato su centinaia di casse mutue in concorrenza fra di loro. Quest'ultimo si è rivelato essere particolarmente efficiente in questa situazione di emergenza sanitaria, in quanto presenta numerosi piccoli centri dispersi sul territorio nazionale, che costituiscono una fitta rete capillare con numerosi posti disponibili in terapia intensiva.

### 3.3 Validazione dei modelli SD creati

Costruiti i modelli SD, raffiguranti le dinamiche della diffusione della pandemia nei differenti Paesi, appare necessario valutarne la relativa bontà, confrontando l'andamento ricreato dai modelli SD con quello reale che si evince dal dataset stesso. Chiaramente non si ricerca una perfetta riproduzione dei dati, quanto piuttosto una corretta approssimazione.

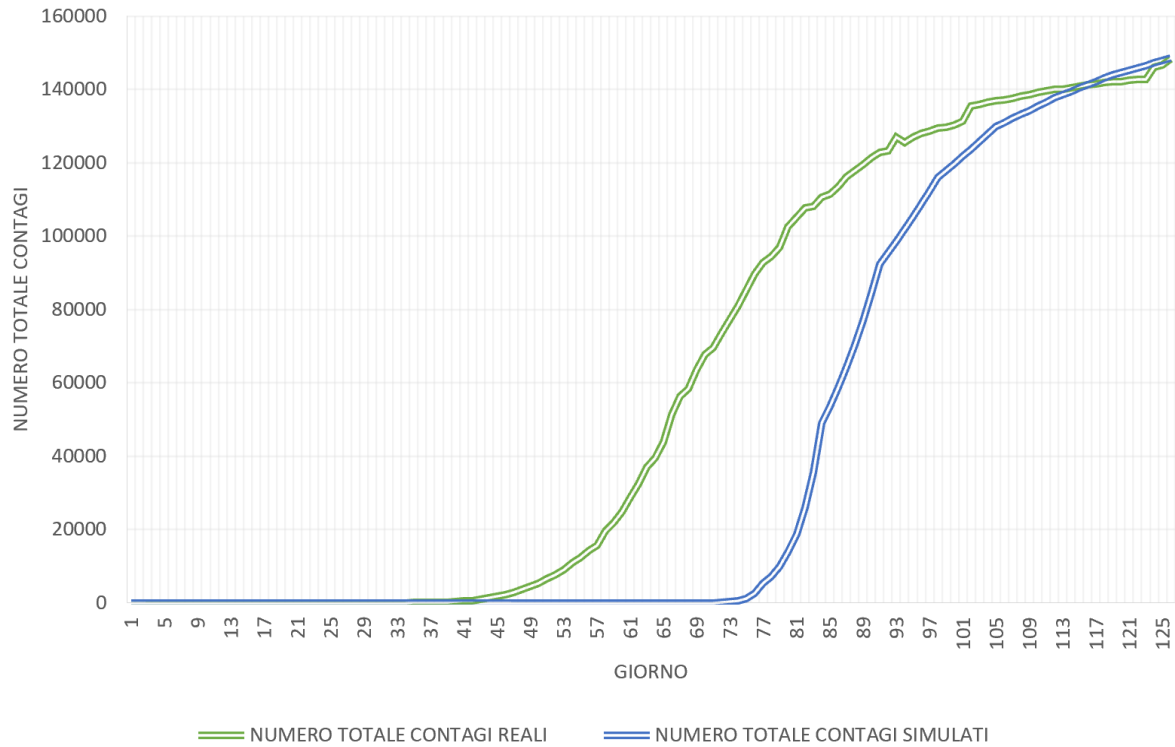
Nel caso della Spagna, il grafico di confronto in *Figura 45* mostra come il comportamento del modello sia coerente con gli andamenti reali, per cui è possibile affermare, al netto di piccole differenze, che la simulazione condotta risulta robusta.



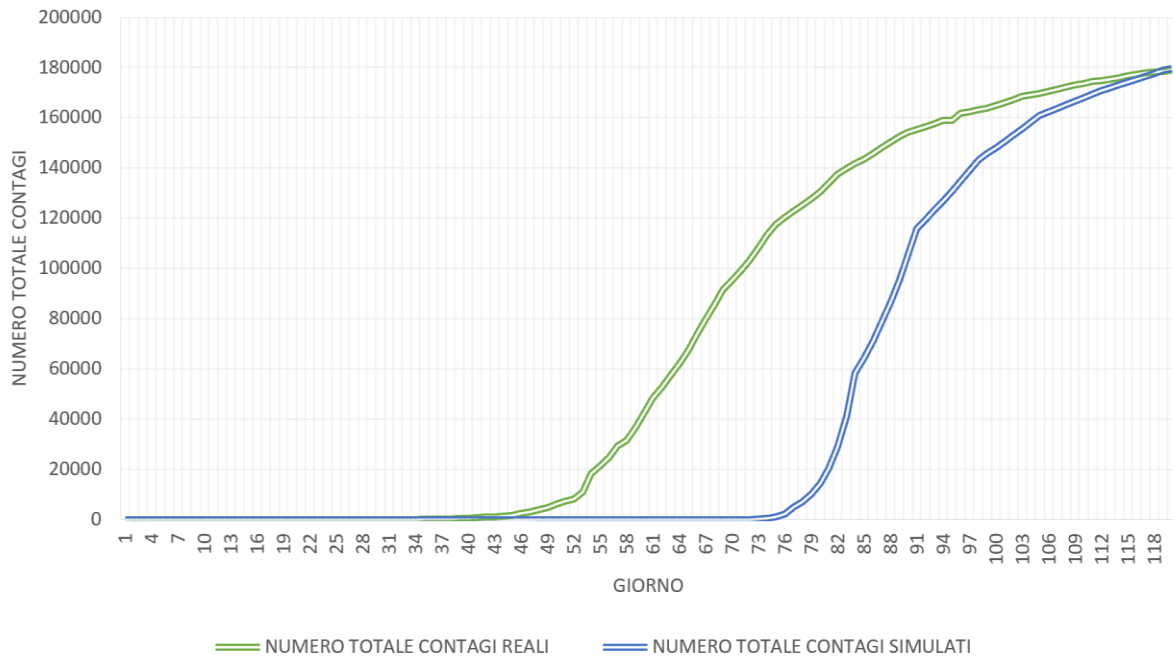
**Figura 45:** Grafico di confronto tra l'andamento del COVID-19 reale e quello simulato nel caso della Spagna

Dall'osservazione delle *Figure 46, 47 e 48*, relative alla Francia, alla Germania e agli Stati Uniti d'America, emerge invece un andamento dei contagi simulati simili a quelli dei casi reali registrati nel dataset, ma spostato nel tempo di circa 15-20 giorni. Questo ritardo potrebbe essere dovuto all'assunzione propria del modello di non considerare la trasmissione del virus per contatto indiretto ma unicamente quella originata dal contatto interpersonale, come riportato al paragrafo 4.1. Inoltre, la crescita ritardata potrebbe essere dovuta anche alla presenza di casi asintomatici e di individui contagiati ma non ancora positivi al tampone, i quali risultano però contagiosi per la società. Tali valutazioni, se fossero considerate, comporterebbero infatti

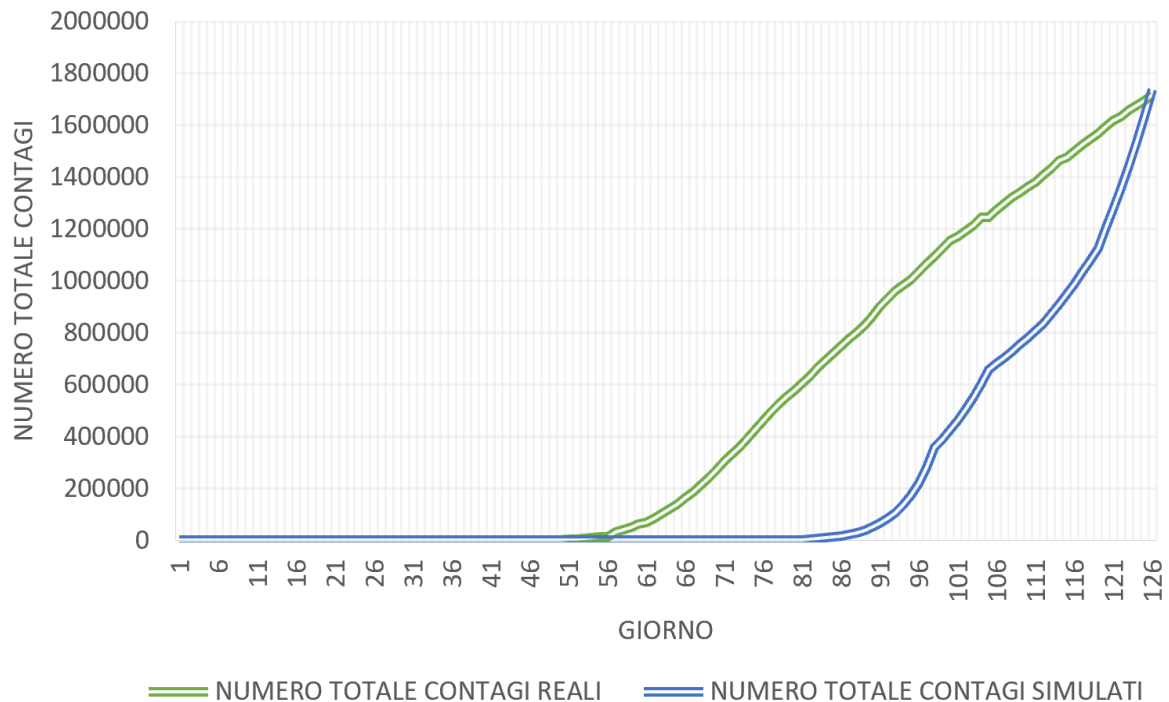
l'aumento del valore dell'infettività, con un'importante riduzione del ritardo; perciò, nel complesso i risultati appaiono soddisfacenti.



**Figura 46:** Grafico di confronto tra l'andamento reale e quello simulato nel caso Francia



**Figura 47:** Grafico di confronto tra l'andamento reale e quello simulato nel caso Germania



**Figura 48:** Grafico di confronto tra l'andamento reale e quello simulato nel caso USA

In definitiva è quindi possibile ritenere i modelli e le rispettive equazioni buone rappresentazioni della realtà e confermare che il modello di Bass è con ragionevole approssimazione in grado di catturare la dinamica di evoluzione della pandemia COVID-19.

### 3.4 Analisi di sensitività: creazione di tre scenari ipotetici

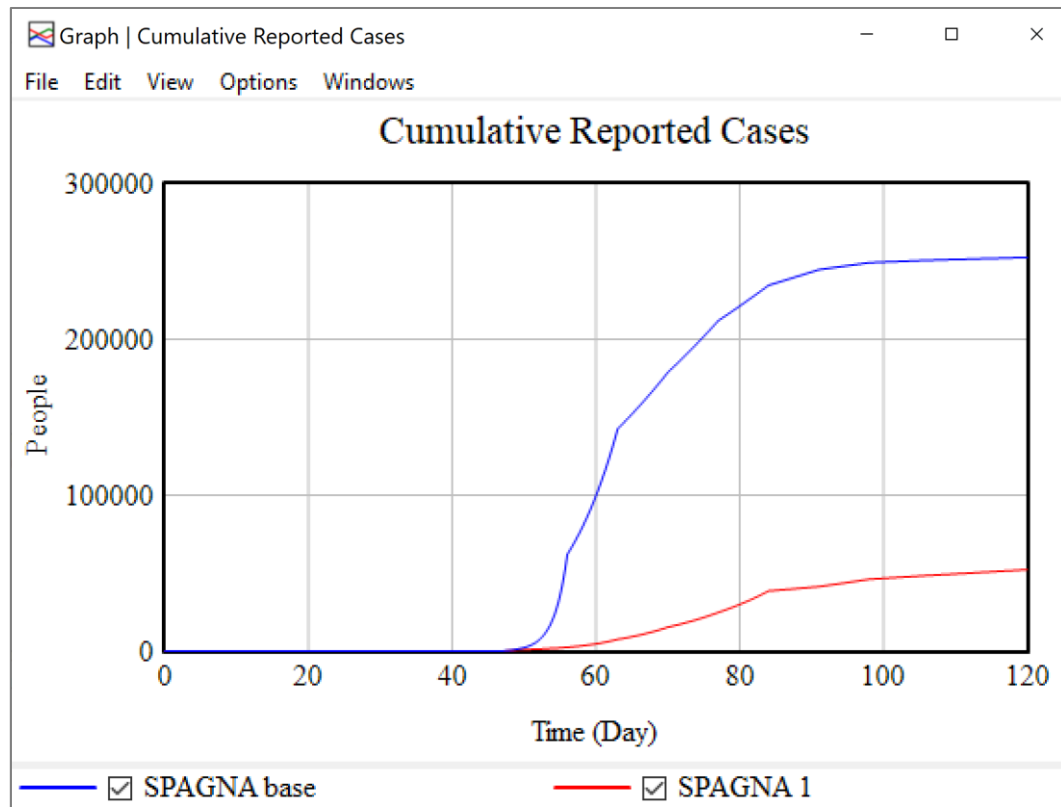
Finora si è considerata una popolazione a tratti libera di circolare ed in alcuni casi soggetta a diverse tipologie di restrizioni, in base al Paese considerato, finalizzate al contenimento della pandemia. Pertanto, nella seguente sezione si andrà ad osservare come sarebbe cambiato l'andamento dei contagi nei Paesi in esame, se i loro governanti avessero adottato misure restrittive differenti da quelle reali. A tal fine si andranno a modificare i valori della variabile **Contact Frequency** nei vari modelli SD e, nel paragrafo 3.5, a discuterne criticamente i risultati. L'analisi di sensitività che si andrà a condurre consisterà nella creazione di tre scenari ipotetici, rappresentanti diversi gradi di restrizioni alla socialità: il primo prevederà il *lockdown* totale, il secondo non considererà alcuna misura contenitiva ed il terzo raffigurerà un *lockdown light*, più leggero.

### 3.4.1 Scenario 1: Lockdown

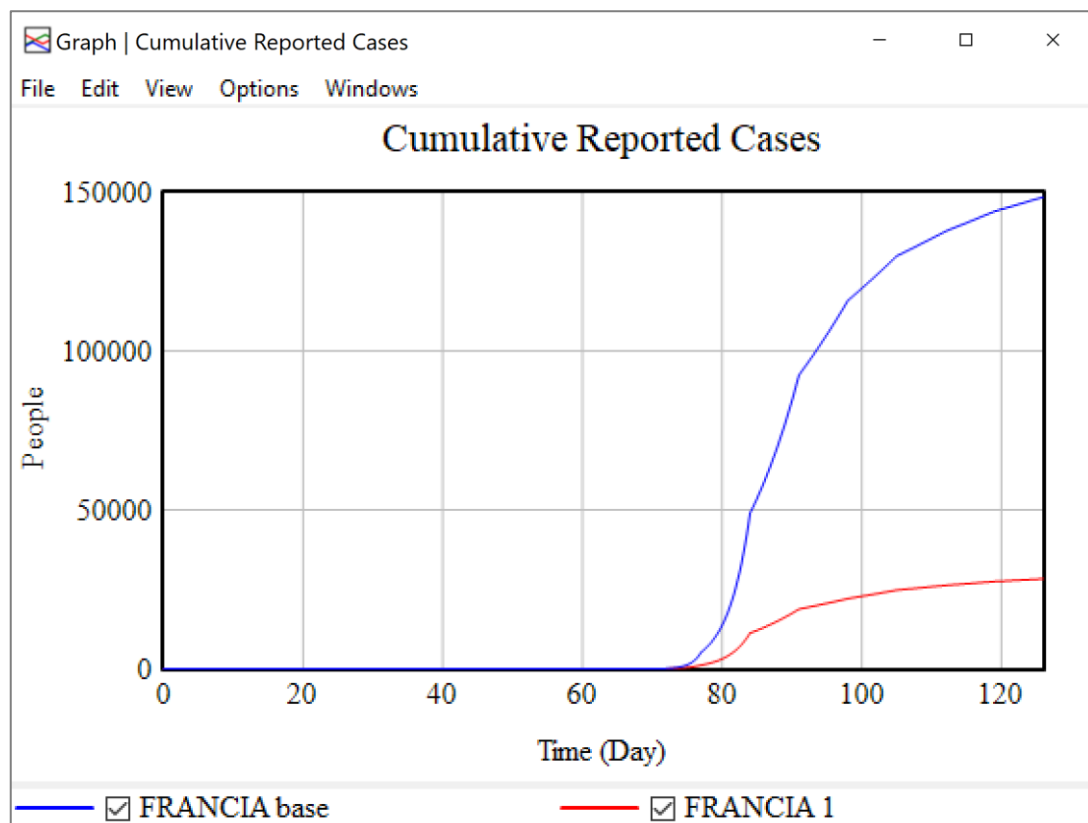
Con il termine *lockdown* si fa riferimento al protocollo d'emergenza attuato dalle autorità per limitare i contatti tra individui, imponendo quarantene, coprifuochi e restrizioni agli spostamenti con l'obiettivo di bloccare la diffusione del virus SARS-CoV-2. Nello specifico, i diversi Paesi hanno adottato misure di *lockdown* differenti tra di loro: la Spagna ha deciso di intervenire sospendendo le attività economiche non essenziali da fine marzo e di introdurre l'obbligo di DPI solamente a fine maggio; la Francia invece ha preferito dapprima sospendere raduni oltre 100 persone, per poi optare per la chiusura di tutti i luoghi pubblici fino a fine maggio, non arrestando mai le produzioni non essenziali. La Germania ha previsto la chiusura di luoghi e di eventi pubblici circa una settimana dopo la comparsa del terzo caso positivo, tuttavia mai optando per la chiusura di negozi e produzioni non essenziali. Gli USA al contrario hanno sospeso gli ingressi dalla Cina già a gennaio, negando fin da subito l'evidenza del contagio nel Paese, decidendo di non adottare un *lockdown* a livello nazionale ma lasciando la libertà di decisione ai differenti Stati.

Nel presente scenario, tuttavia, verrà rappresentata la condizione, uguale per tutti i Paesi, di confinamento di chiusura totale, prevista dal principio dell'orizzonte temporale. Al fine di ricreare la condizione di costrizioni descritta, si è andati a modificare i valori della **Contact Frequency** di ogni Paese, in modo da rappresentare il ristretto numero di interazioni sociali. Di seguito sono esposti i grafici relativi alla Spagna (*Figura 49*), Francia (*Figura 50*), Germania (*Figura 51*) e Stati Uniti (*Figura 52*), nei quali ai risultati concernenti questo primo scenario ipotizzato, raffigurato in rosso, si aggiunge in blu l'output della simulazione del modello base come riferimento.

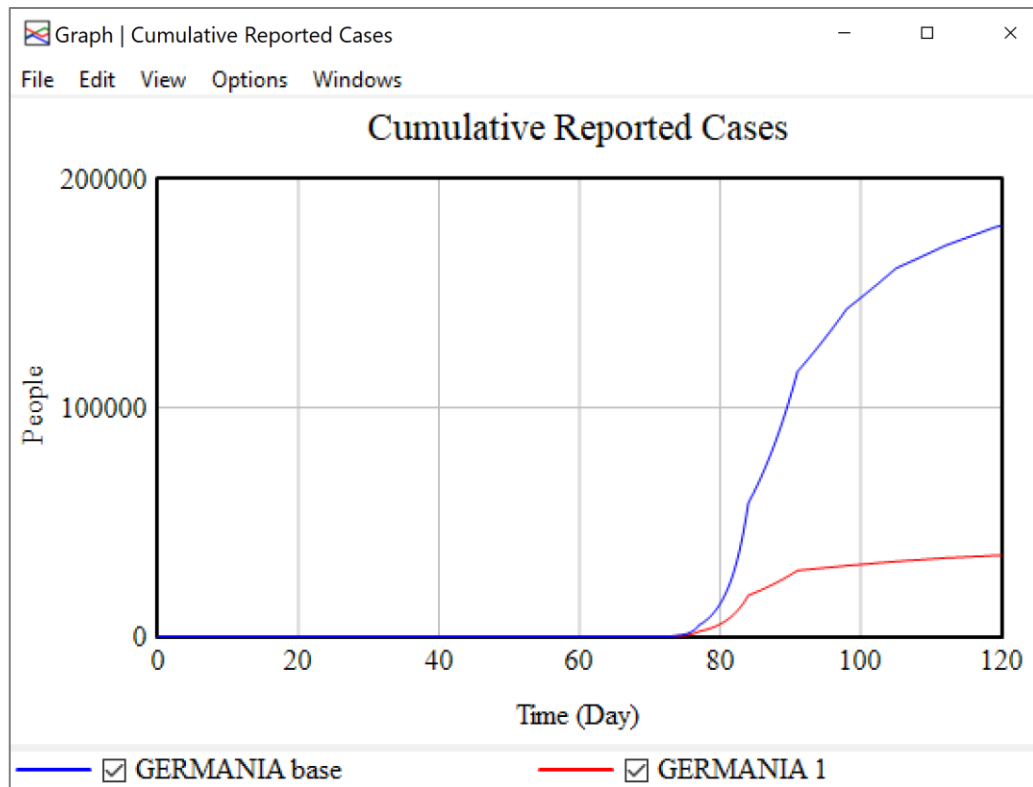




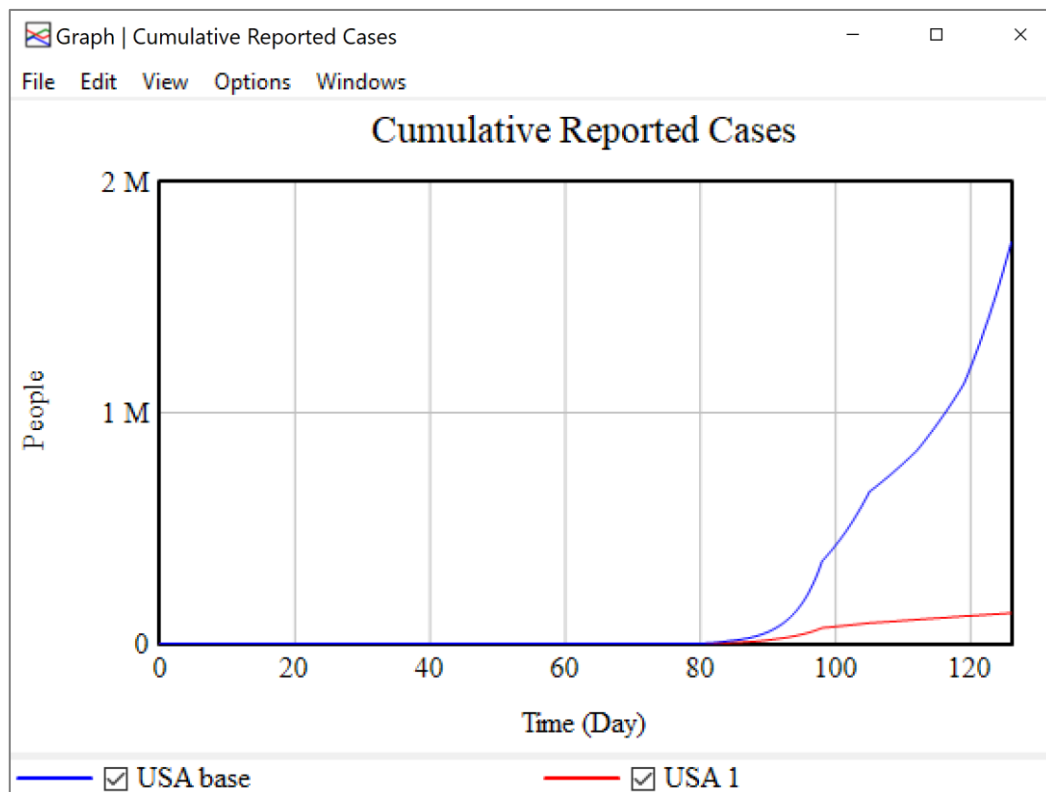
**Figura 49:** Andamento simulato del primo scenario per la Spagna e andamento base



**Figura 50:** Andamento simulato del primo scenario per la Francia e andamento base



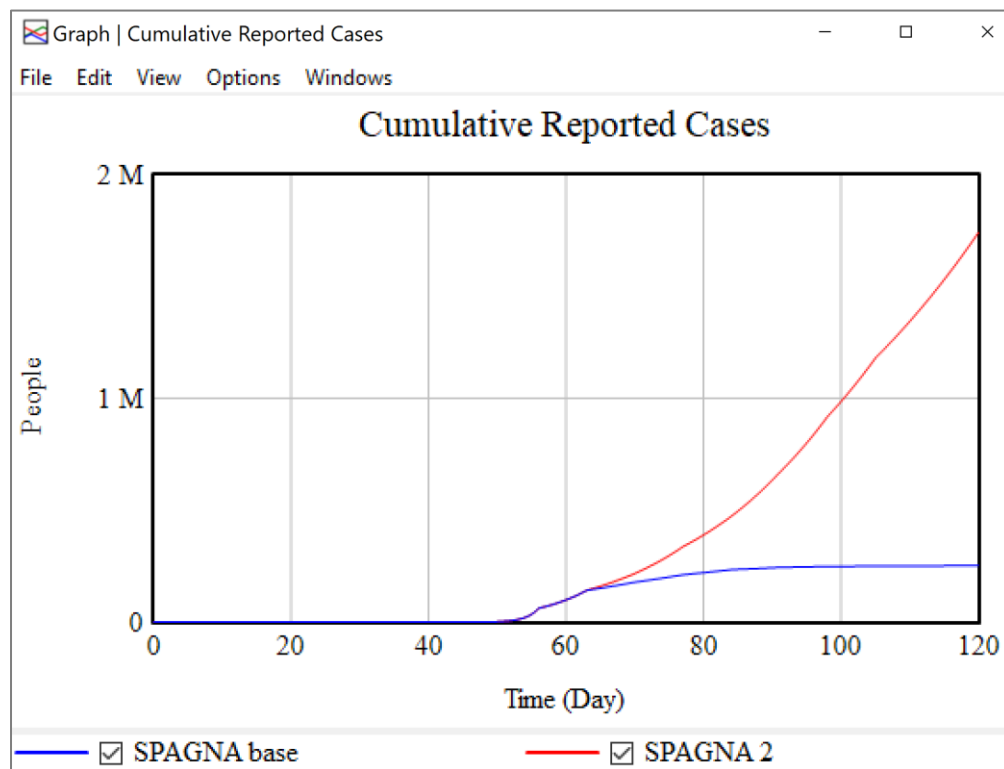
**Figura 51:** Andamento simulato del primo scenario per la Germania e andamento base



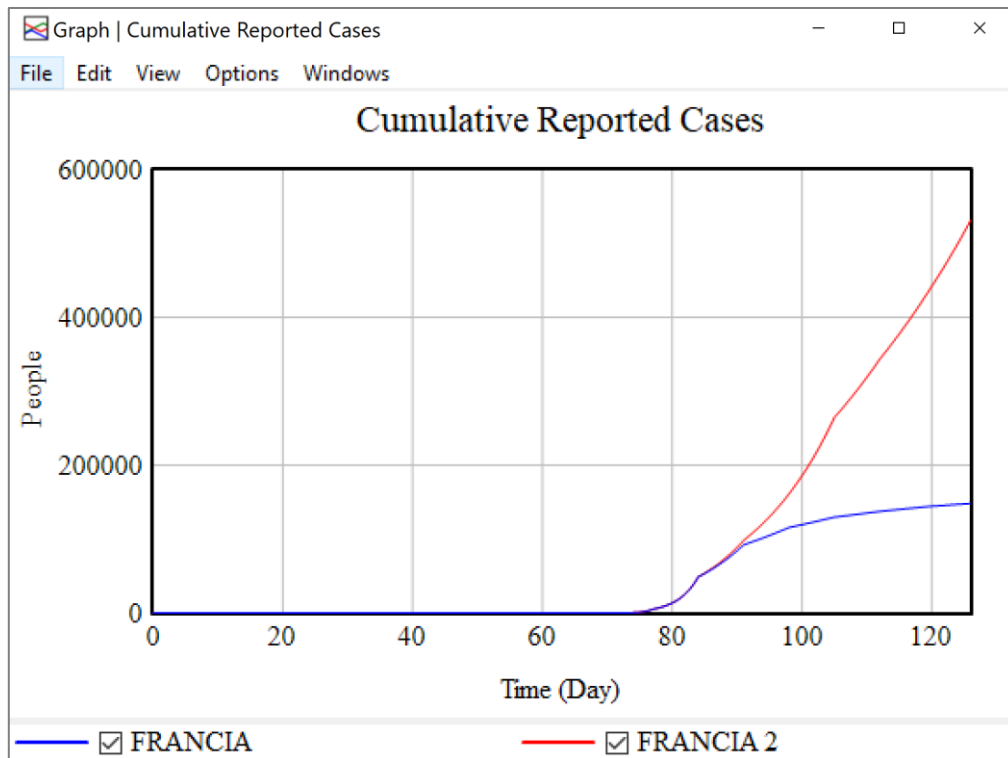
**Figura 52:** Andamento simulato del primo scenario per gli USA e andamento base

### 3.4.2 Scenario 2: Assenza di misure restrittive

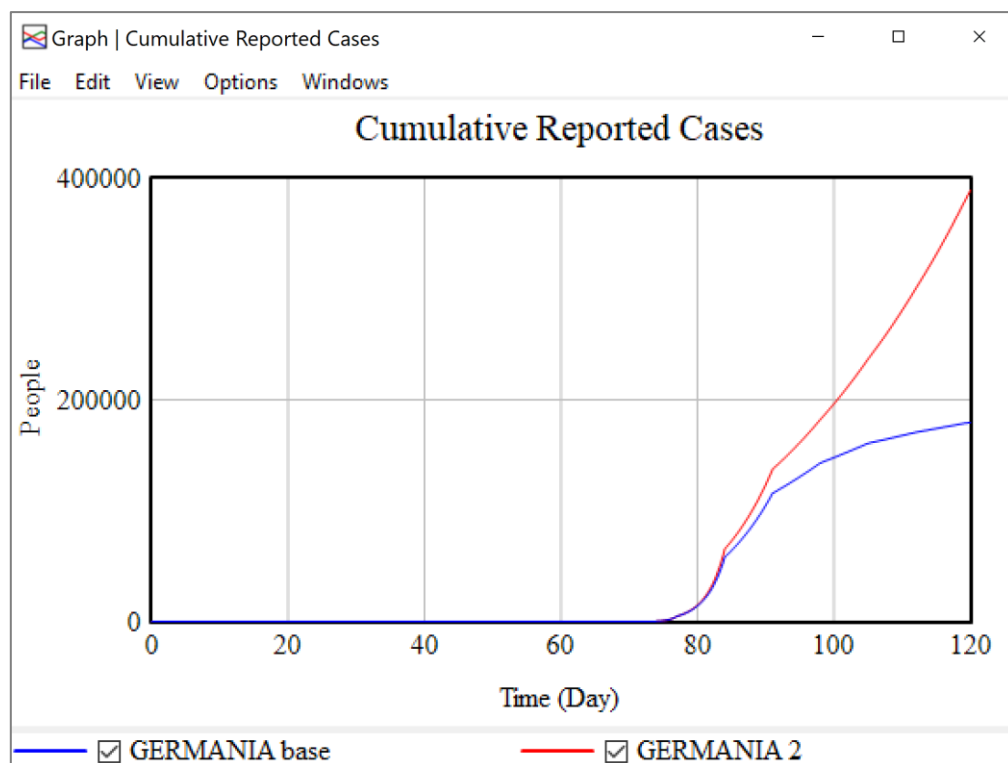
Il secondo scenario ipotizzato prevede l'eliminazione di tutte le possibili misure restrittive, rendendo così possibile osservare come si sarebbe comportato il virus se non fossero state adottate alcune politiche di contenimento da parte dei governi. Per rappresentare tale circostanza si è proceduto andando ad aumentare i valori assegnati alla **Contact Frequency** e ricreando così un'alta frequenza di contatti interpersonali, tipica della vita in condizioni di non emergenza, in cui è quindi permessa la libera circolazione. A tal proposito si sono riportati i grafici di Spagna (*Figura 53*), Francia (*Figura 54*), Germania (*Figura 55*) e Stati Uniti (*Figura 56*), raffigurando il caso base in blu e il secondo scenario in rosso.



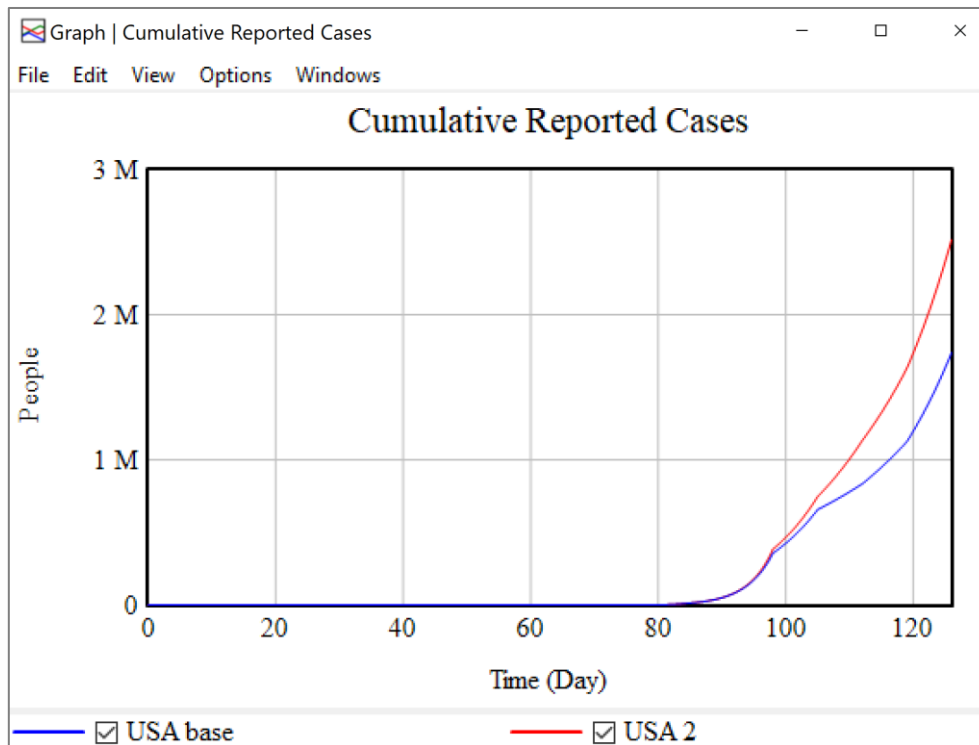
**Figura 53:** Andamento simulato del secondo scenario per la Spagna e andamento base



**Figura 54:** Andamento simulato del secondo scenario per la Francia e andamento base



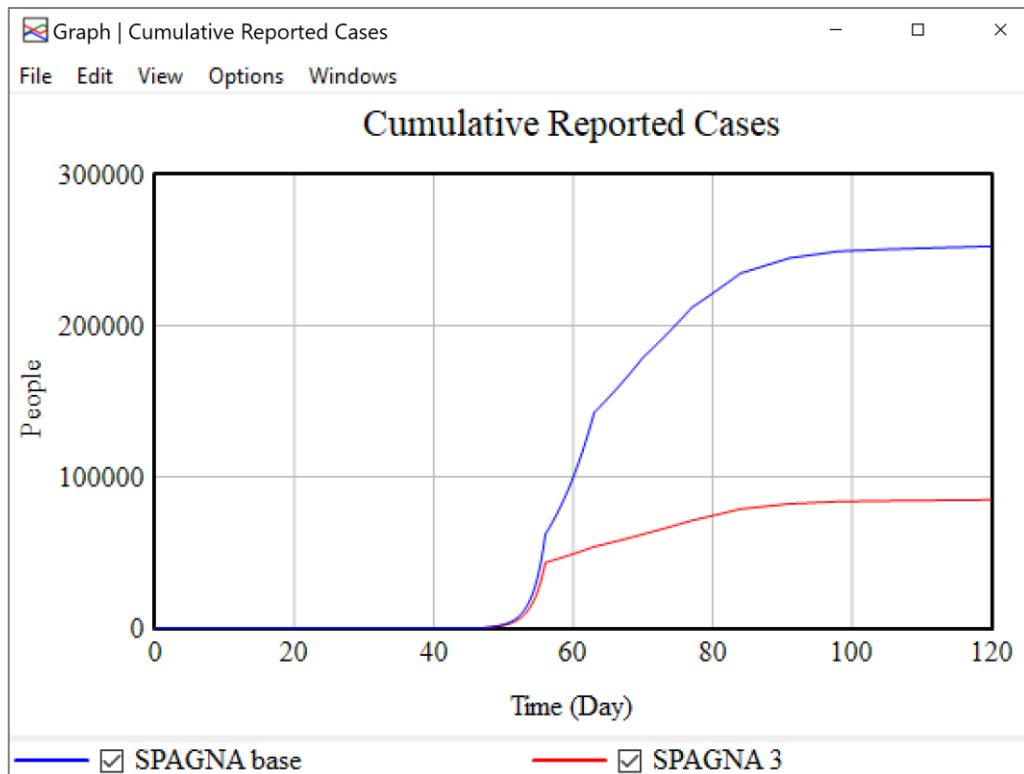
**Figura 55:** Andamento simulato del secondo scenario per la Germania e andamento base



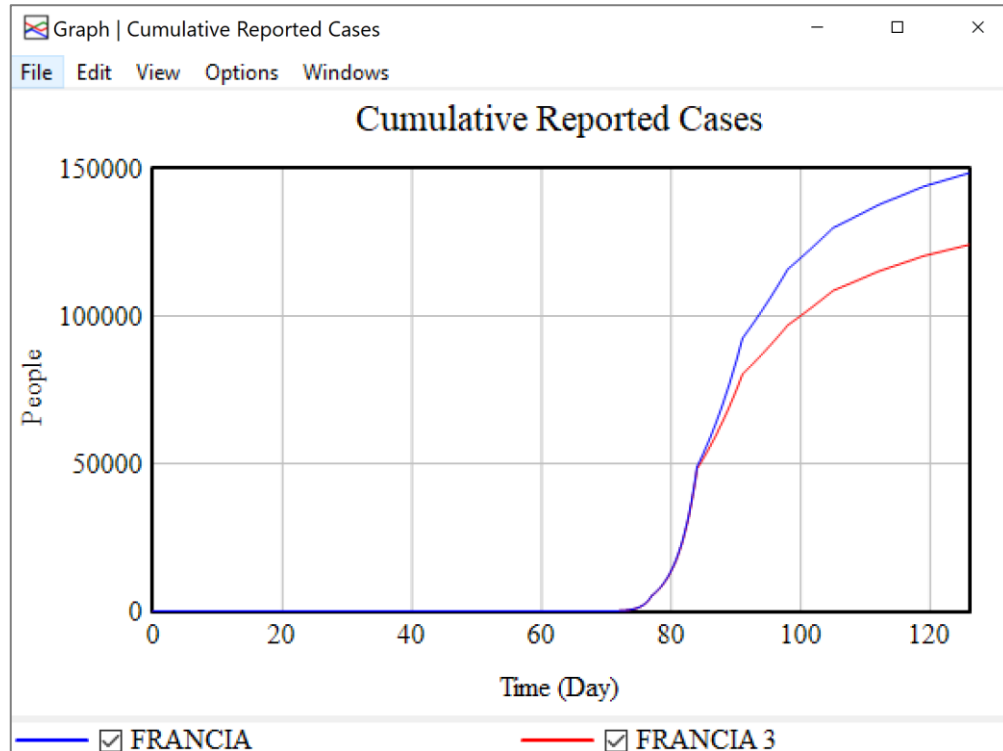
**Figura 56:** Andamento simulato del secondo scenario per gli USA e andamento base

### 3.4.3 Scenario 3: Lockdown light

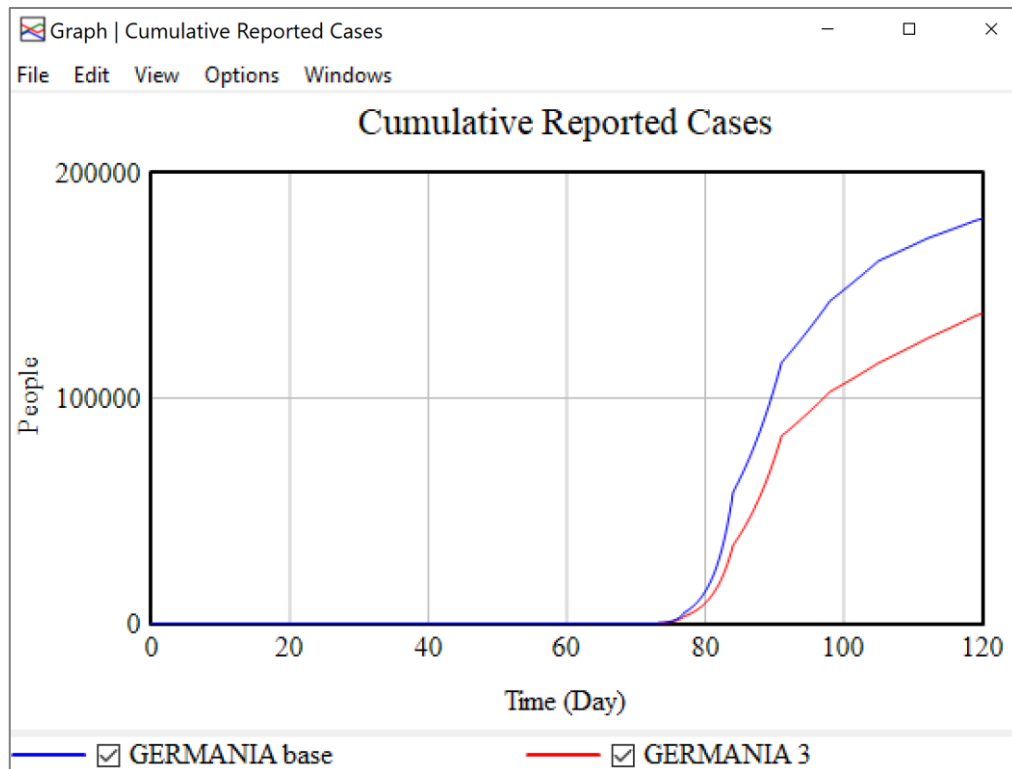
In quest'ultimo scenario ipotizzato si rappresenta il caso di un *lockdown light*, simile a quello descritto al paragrafo 3.4.1 ma meno restrittivo, che prevede la riduzione al minimo delle interazioni sociali e degli spostamenti ma al contempo senza risultare estremo, permettendo quindi determinate attività considerate di prima necessità per la popolazione. Si prevede dunque la chiusura di tutti i luoghi che comportano assembramento, quali ristoranti, bar, palestre, teatri e cinema ma si considerano garantite le attività lavorative e scolastiche. In tal senso, per poter rappresentare lo scenario descritto si è andati ad assegnare alla **Contact Frequency** valori intermedi, superiori a quelli attribuiti nel primo caso e largamente inferiori a quelli del secondo. Di seguito si mostrano i grafici raffiguranti il terzo scenario ipotizzato in rosso e il caso base come riferimento in blu per Spagna (*Figura 57*), Francia (*Figura 58*), Germania (*Figura 59*) e Stati Uniti (*Figura 60*).



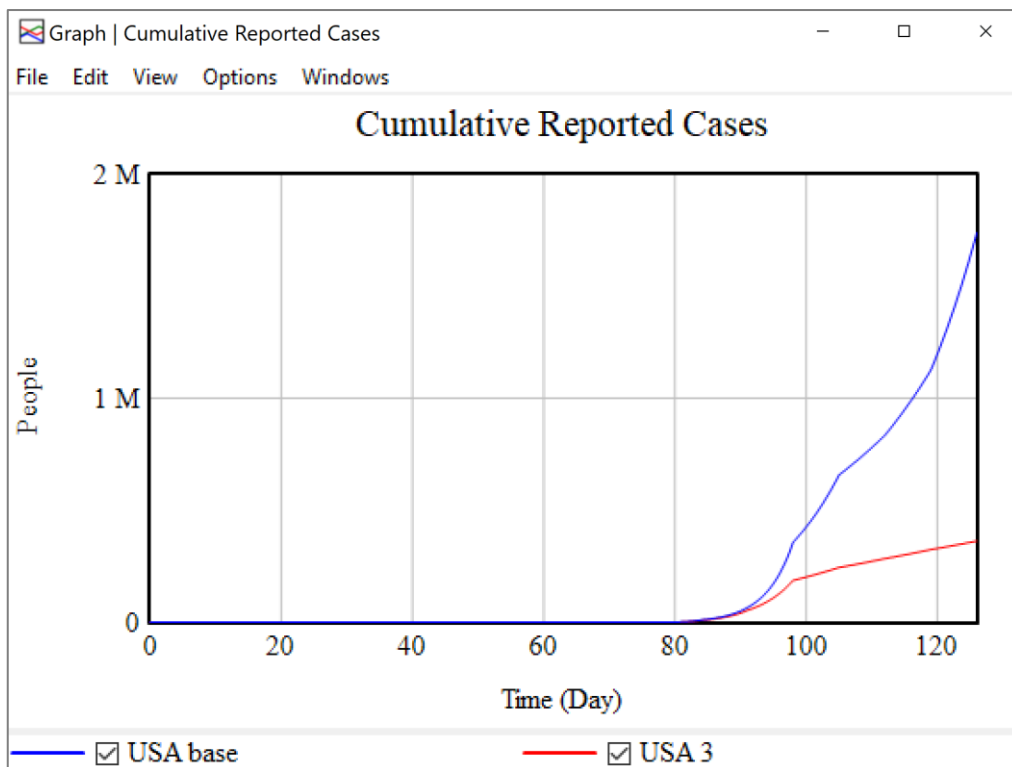
**Figura 57:** Andamento simulato del terzo scenario per la Spagna e andamento base



**Figura 58:** Andamento simulato del terzo scenario per la Francia e andamento base



**Figura 59:** Andamento simulato del terzo scenario per la Germania e andamento base



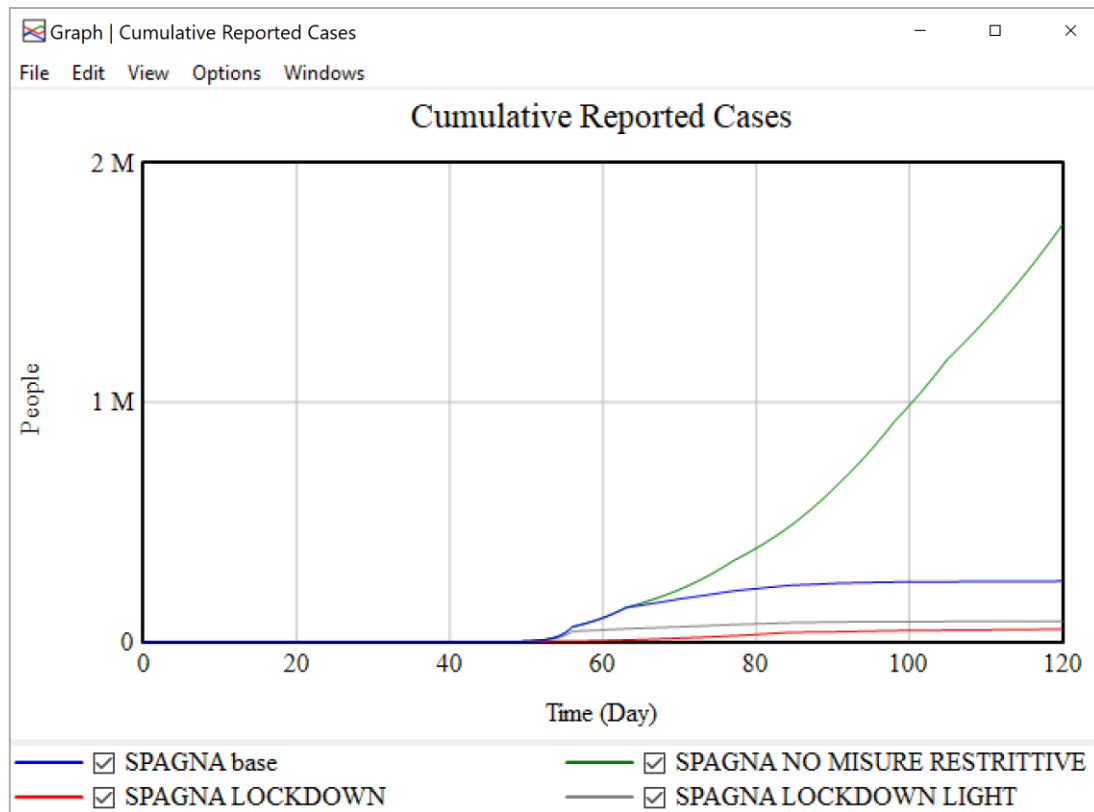
**Figura 60:** Andamento simulato del terzo scenario per gli USA e andamento base

### 3.5 Risultati ottenuti

Illustrati al paragrafo 3.4 i diversi scenari esplorati è ora possibile discuterne criticamente i risultati ottenuti. Come si evince dai grafici di confronto raffigurati nelle *Figure 61, 62, 63 e 64*, gli andamenti dei Paesi generati nei diversi scenari accumulano tutti i modelli SD creati. Infatti partendo dal caso ipotizzato del *lockdown totale*, si nota che se tutti gli Stati avessero attuato tale protocollo, immediatamente dopo la comparsa del primo caso di positività al SARS-CoV-2, la situazione sarebbe stata decisamente più sottocontrollo. In tal senso, si può osservare come in tutti i Paesi il trend relativo al primo scenario sia pressochè stabile e potrebbe confermarsi tale in quanto, grazie all'isolamento, le persone infette guarirebbero sviluppando una resistenza verso il patogeno e portando così all'immunità di gregge [20]. Così dimostrando, ancora una volta, l'importanza e l'efficacia della rapidità di risposta da parte delle autorità nella lotta al contenimento del virus. Un discorso simile riguarda lo scenario del *lockdown light* ipotizzato, infatti anche in questa circostanza il numero di contagi riportati sarebbe stato inferiore, tuttavia non discostandosi in modo troppo marcato da quanto accaduto realmente nei Paesi europei, nei quali la popolazione è stata infatti soggetta a limitazioni di diversa entità nell'arco temporale considerato.

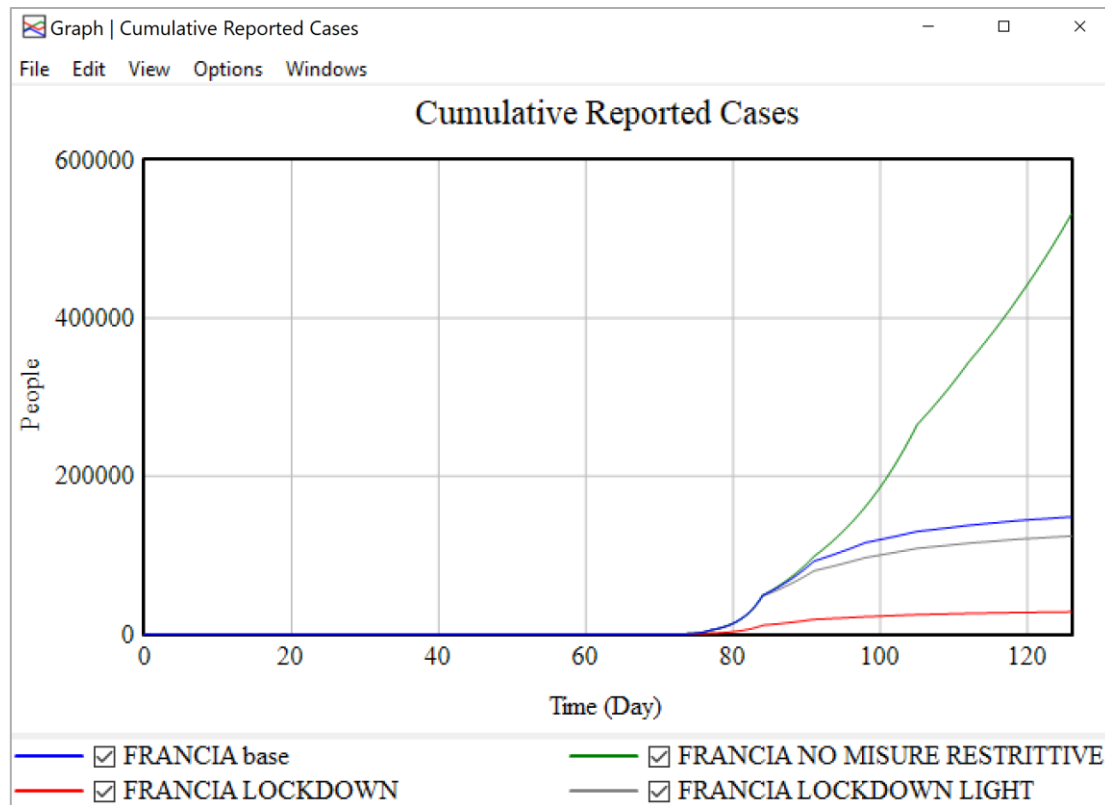
Iniziando con il caso della Spagna, rappresentato in *Figura 61*, è possibile notare come l'andamento simulato nel terzo scenario sia appunto quello più affine a quello reale, tuttavia ancora nettamente inferiore, questo potrebbe esser dovuto alla lenta reattività del Paese nell'introduzione di misure restrittive e norme comportamentali, come l'obbligo di indossare la mascherina introdotto solo a fine maggio, che hanno portato la popolazione spagnola ad allontanarsi dai bassi valori che si sarebbero verificati nel caso di un *lockdown light*, o ancora meglio in un *lockdown totale*. Tuttavia, tali tardivi accorgimenti sono risultati comunque fondamentali nel contenimento, come mostra la crescita largamente più rapida che si sarebbe verificata se non fossero state apportate misure restrittive.





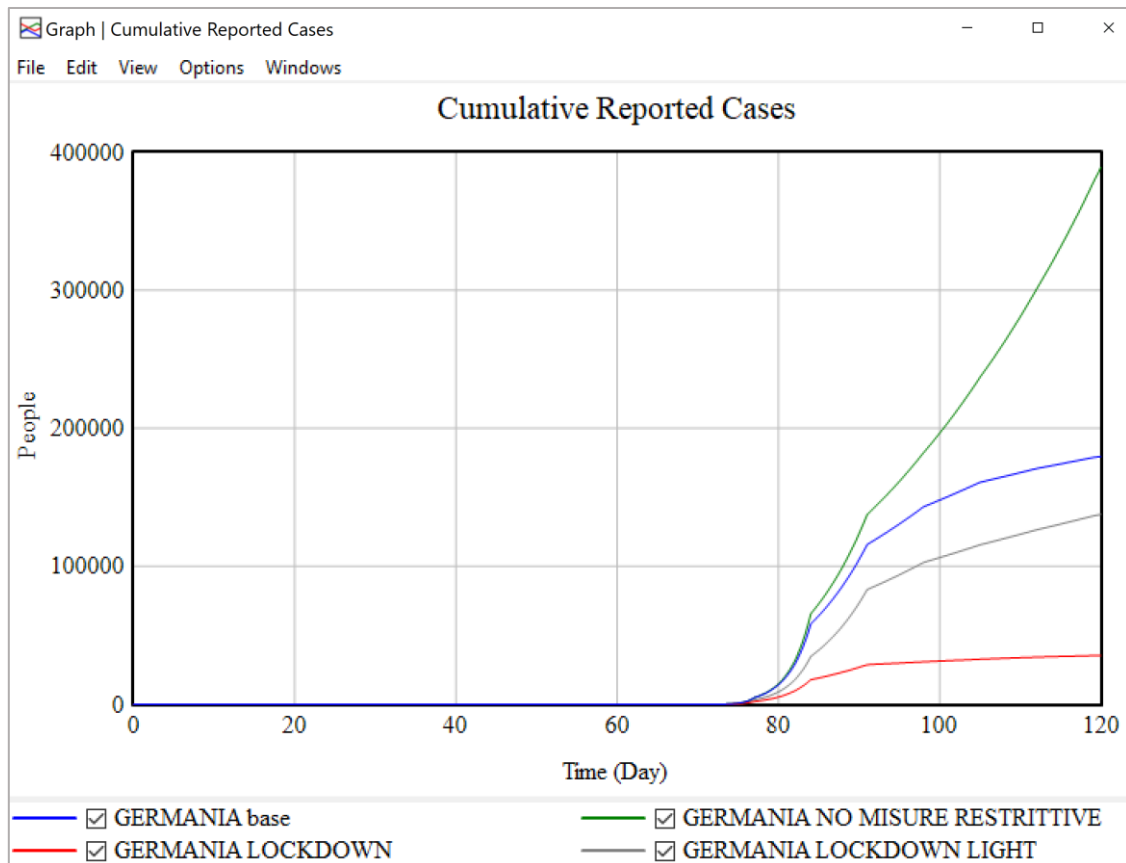
**Figura 61:** Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base della Spagna

Proseguendo con il caso della Francia raffigurato in *Figura 62*, è possibile notare come in questo caso l'andamento reale si avvicini maggiormente al caso del *lockdown light* rispetto a quanto succedesse per la Spagna. Ciò dimostra come i francesi abbiano avuto un comportamento più scrupoloso nei confronti della pandemia, supportato anche dall'aumento più contenuto dei casi di positività che si registrerebbero in caso di assenza di misure restrittive. Tuttavia, nel complesso la Francia sembra aver reagito nel modo corretto nell'intervallo di tempo che si estende da marzo a maggio, posizionandosi ad un livello intermedio tra i due scenari estremi, cercando così di preservare la salute dei cittadini, ma al contempo di non fermare completamente l'economia nazionale. A spiegare almeno in parte la situazione critica dei mesi successivi, potrebbe essere la concomitanza di alcuni fattori sia a livello di tempistica, sia di strumenti a disposizione nella risposta strategica alla pandemia, sia di comportamenti meno rigorosi dei cittadini. È appunto stata registrata nel popolo francese una reazione di “*stanchezza da Coronavirus*” dovuta alla mancata libertà dei mesi primaverili, infatti a partire da fine giugno le abitudini dei francesi sono risultate molto cambiate, soprattutto in vacanza, e sembra che le regole igienico-sanitarie siano state osservate con meno diligenza [24].



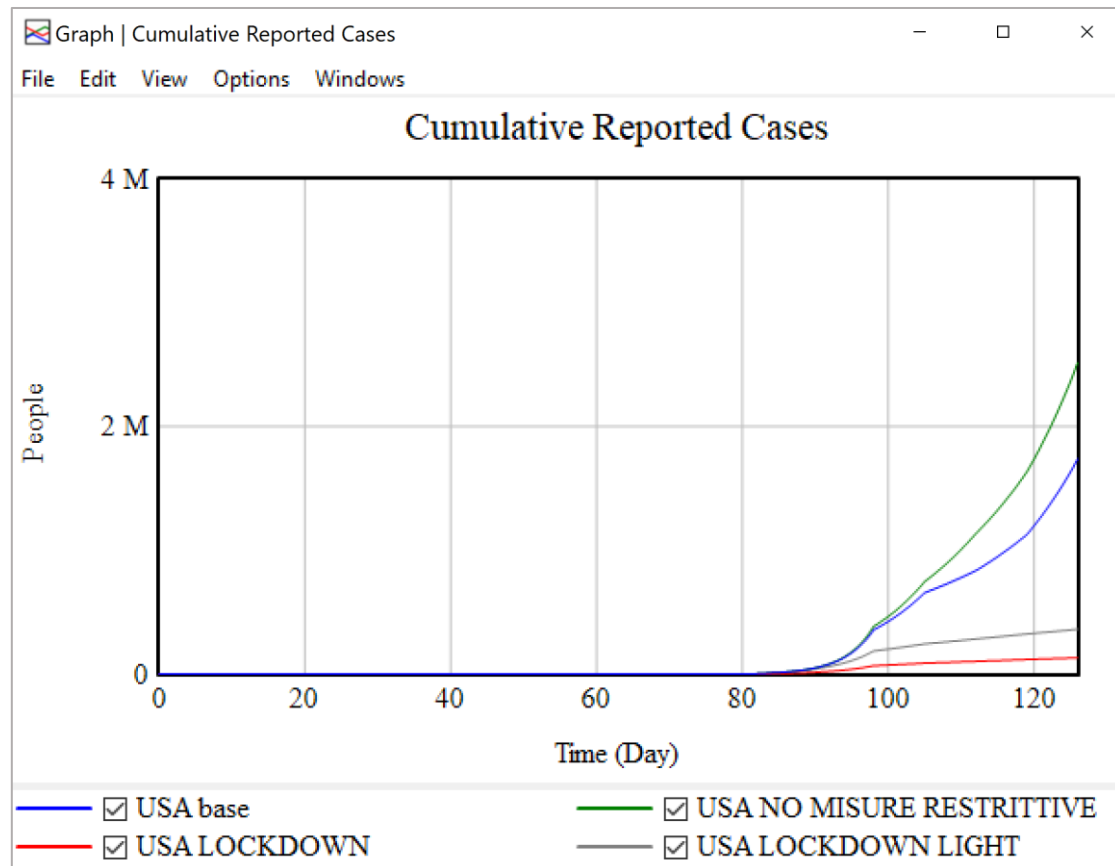
**Figura 62:** Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base della Francia

Anche nel caso della Germania, come per gli altri Paesi Europei, la curva raffigurante gli andamenti reali si avvicina maggiormente al terzo scenario di *lockdown light*, dal grafico in *Figura 63* a spiccare maggiormente è il secondo scenario simulato, rappresentante la completa assenza di misure restrittive. Infatti, è possibile notare come per la Germania, la mancata adozione di politiche contenitive avrebbe comportato una crescita nettamente inferiore rispetto agli altri Stati esaminati, raggiungendo poco più del doppio di contagi. Questo potrebbe trovare giustificazione nella ligia condotta e nella scrupolosità nel seguire le regole che contraddistingue il popolo tedesco e che lo avrebbe in qualsiasi caso portato ad assumere comportamenti più responsabili, forse indotti anche dalla strategia comunicativa scelta dalla Germania, incentrata sul dover affrontare la situazione d'emergenza con serietà e rigore. Inoltre, oltre al fattore socioculturale descritto, bisogna considerare la prontezza che ha caratterizzato la Germania in questa situazione d'emergenza, risultando molto efficiente nell'individuazione dei casi di positività e nel loro arginamento, attraverso numerosi test ai quali è stata sottoposta la popolazione tedesca fin dal principio e agli efficienti tracciatori [23]. Anche in questo caso la scelta di un *lockdown totale*, adottato tempestivamente dopo la comparsa dei primi casi, avrebbe comportato un numero di contagiati molto più esigue, tuttavia, come nel caso della Francia, la Germania sembra aver attuato un compromesso abbastanza vincente.



**Figura 63:** Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base della Germania

Contrariamente a quanto descritto finora per i paesi europei, come si evince dalla *Figura 64*, gli Stati Uniti d'America presentano un output del modello SD base molto più simile a quello descritto dal secondo scenario ipotizzato, che prevede la libera circolazione degli individui in assenza di misure restrittive. Questo è in linea con la decisione del governo americano di non adottare rigidi accorgimenti atti al contenimento della diffusione del COVID-19 sul suolo nazionale e avvicinando così la situazione reale americana a quella che si sarebbe verificata nel caso di assenza di restrizioni. Dall'osservazione dei risultati che si sarebbero raggiunti con l'attuazione degli scenari 1 e 3, si evince come gli USA con l'introduzione di accorgimenti più rigidi e con atteggiamenti meno atti alla minimizzazione del problema avrebbero potuto evitare un così elevato numero di contagi.



**Figura 64:** Confronto tra i tre scenari ipotizzati e il caso base degli USA

# 4 Conclusioni

In questo capitolo conclusivo dell'elaborato si andranno ad illustrare i benefici del lavoro di tesi, le limitazioni e gli spunti di ricerca futura derivabili dai risultati dello studio.

## 4.1 Benefici del lavoro di tesi

Lo studio sviluppato in questo lavoro di tesi può essere considerato un contributo per riuscire a prevedere, in modo piuttosto accurato, l'andamento della diffusione della pandemia nei diversi Stati del mondo. È stato fornito dunque un modello iniziale sul quale basarsi per poter osservare cosa comporterebbe l'adozione o meno di determinate misure restrittive, emerse fondamentali nella lotta contro la pandemia, ed aiutando così i governanti a prendere decisioni. Questo è stato reso possibile grazie all'applicazione di un modello diffusionale dell'innovazione, di Bass, capace di considerare al contempo l'infettività del virus e la frequenza dei contatti interpersonali, regolati dalle politiche di contenimento adottate dai Paesi. Inoltre, grazie alla metodologia System Dynamics è stato possibile andare a simulare gli andamenti ed avere quindi un impatto anche visivo delle differenti condizioni ipotizzate. Dal presente studio, è in aggiunta emersa l'importanza dell'adozione tempestiva di misure restrittive da parte dei governanti, per poter tenere sotto controllo la diffusione del virus, a tal fine è risultata fondamentale anche la relativa prontezza degli Stati all'emergenza sanitaria. Inoltre, si è notato come fattori tra cui quello socioculturale, unito alla strategia comunicativa scelta dalle istituzioni, giochino un ruolo significativo nel comportamento assunto dalla popolazione, portando così ad aumentare o controllare maggiormente la propagazione del COVID-19.

## 4.2 Limitazioni del lavoro di tesi

I modelli descritti nel capitolo 3 presentano alcune limitazioni dovute alla semplificazione del processo diffusionale virale condotta. In tal senso, si è ritenuto opportuno tener traccia nei modelli SD unicamente del numero degli individui contagiati in un determinato istante di tempo, in quanto variabile più significativa, tralasciando la componente costituita da guariti o deceduti, da introdurre magari in un futuro ampliamento. A tal riguardo, non è stato fattibile considerare la possibilità che un individuo infetto, una volta guarito possa nuovamente essere contagiato, cosa invece dimostrata scientificamente nel caso del COVID-19 [10]. Inoltre, si assume che la patologia si manifesti velocemente dopo il contatto con un individuo infetto, per cui non viene tenuto conto del periodo di incubazione del SARS-CoV-2, che come esposto al paragrafo 1.1, potrebbe essere anche pari a 12-15 giorni. In aggiunta al paragrafo 1.1 vengono anche descritte le principali modalità di trasmissione proprie del virus in esame, ossia il contagio diretto attraverso via aerea ed il contagio indiretto tramite superfici contaminate. Nel seguente elaborato si è considerata trascurabile la trasmissione appartenente alla seconda e alla terza tipologia, in quanto è stato dimostrato essere una parte poco impattante sul numero di contagi e facilmente controllabile con le giuste precauzioni igieniche [21]. Inoltre, la frequenza dei viaggi tra i Paesi, fondamentale nella diffusione della pandemia a livello globale, non sembra di grande rilevanza nel confronto tra le diverse nazioni qui esaminate, in quanto tutti gli Stati trattati presentano già il SARS-CoV-2 all'interno del loro territorio e poiché durante il periodo esaminato sono state previste in modo univoco misure restrittive atte a limitare il più possibile le entrate e le uscite di persone dai propri confini [22]. A tutto ciò si devono sommare anche le limitazioni proprie del dataset costruito, esposte nel paragrafo 2.1.2.

### 4.3 Spunti futuri di ricerca

Il presente elaborato ha previsto l'analisi dei dati a livello globale registrati nell'orizzonte temporale che si estende dal 20/01/2020 al 31/05/2020, dunque sarebbe interessante poter ampliare tale arco di tempo e portarlo fino ad oggi, andando ad ipotizzare anche in questo caso differenti scenari ed osservare cosa riserverebbero per il futuro. Inoltre, sarebbe stimolante simulare la condizione di introduzione del vaccino ed esaminare come i dati a livello globale cambierebbero, raggiungendo infine la stabilità dovuta alla saturazione, l'immunità di gregge. Oppure modificare e ampliare il modello SD creato in modo da stimare, parallelamente al numero di contagi, anche il livello di guariti, deceduti e di contagiati per la seconda volta. In aggiunta, un ulteriore spunto futuro di ricerca potrebbe consistere nello sviluppare un modello SD capace di considerare anche la capienza delle strutture sanitarie, nello specifico delle terapie intensive, in modo da osservare in che modo queste giungerebbero alla saturazione e riuscire dunque ad anticipare un'emergenza sanitaria che si potrebbe rivelare di grande entità. Inoltre, per arrivare ad avere previsioni più accurate nel tempo, sarebbe necessario andare a migliorare il modello creato, introducendo la soluzione a tutte le limitazioni esposte al paragrafo 4.2, avvicinando in questo modo sempre di più gli andamenti simulati a quelli reali. A tal proposito si potrebbe perfezionare il modello andando ad introdurre una funzione DELAY di *VensimPLE*, capace di restituire il ritardo dovuto al periodo d'incubazione proprio del virus SARS-CoV-2.

# Appendice

## CALIBRAZIONE DELLA VARIABILE CONTACT FREQUENCY NEI DIFFERENTI SCENARI IPOTIZZATI

### SPAGNA

#### LOCKDOWN

Contact Frequency=

$$(5 * \text{PULSE}(0, 7)) + (5 * \text{PULSE}(7, 7)) + (4 * \text{PULSE}(14, 7)) + (5 * \text{PULSE}(21, 7)) + (50 * \text{PULSE}(28, 7)) + (500 * \text{PULSE}(35, 7)) + (507 * \text{PULSE}(42, 7)) + (56 * \text{PULSE}(49, 7)) + (46 * \text{PULSE}(56, 7)) + (25 * \text{PULSE}(63, 7)) + (14 * \text{PULSE}(70, 7)) + (13 * \text{PULSE}(77, 7)) + (2 * \text{PULSE}(84, 7)) + (3 * \text{PULSE}(91, 7)) + (1.2 * \text{PULSE}(98, 7)) + (1 * \text{PULSE}(105, 16))$$

#### NO MISURE RESTRITTIVE

Contact Frequency=

$$(35 * \text{PULSE}(0, 7)) + (35 * \text{PULSE}(7, 7)) + (35 * \text{PULSE}(14, 7)) + (35 * \text{PULSE}(21, 7)) + (50 * \text{PULSE}(28, 7)) + (500 * \text{PULSE}(35, 7)) + (550 * \text{PULSE}(42, 7)) + (220 * \text{PULSE}(49, 7)) + (35 * \text{PULSE}(56, 7)) + (15 * \text{PULSE}(63, 7)) + (13 * \text{PULSE}(70, 7)) + (10 * \text{PULSE}(77, 7)) + (10 * \text{PULSE}(84, 7)) + (9 * \text{PULSE}(91, 7)) + (7 * \text{PULSE}(98, 7)) + (5 * \text{PULSE}(105, 16))$$

#### LOCKDOWN LIGHT

Contact Frequency=

$$(15 * \text{PULSE}(0, 7)) + (25 * \text{PULSE}(7, 7)) + (25 * \text{PULSE}(14, 7)) + (25 * \text{PULSE}(21, 7)) + (30 * \text{PULSE}(28, 7)) + (500 * \text{PULSE}(35, 7)) + (530 * \text{PULSE}(42, 7)) + (210 * \text{PULSE}(49, 7)) + (9 * \text{PULSE}(56, 7)) + (5 * \text{PULSE}(63, 7)) + (4 * \text{PULSE}(70, 7)) + (3 * \text{PULSE}(77, 7)) + (1.2 * \text{PULSE}(84, 7)) + (0.5 * \text{PULSE}(91, 7)) + (0.15 * \text{PULSE}(98, 7)) + (0.1 * \text{PULSE}(105, 16))$$

### FRANCIA

#### LOCKDOWN

Contact Frequency=

$$(5 * \text{PULSE}(0, 7)) + (4 * \text{PULSE}(7, 7)) + (5 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (15 * \text{PULSE}(28, 7)) + (35 * \text{PULSE}(35, 7)) + (35 * \text{PULSE}(42, 7)) + (35 * \text{PULSE}(49, 7)) + (50 * \text{PULSE}(56, 7)) + (550 * \text{PULSE}(63, 7)) + (350 * \text{PULSE}(70, 7)) + (200 * \text{PULSE}(77, 7)) + (40 * \text{PULSE}(84, 7)) + (12 * \text{PULSE}(91, 7)) + (8 * \text{PULSE}(98, 7)) + (4 * \text{PULSE}(105, 7)) + (3 * \text{PULSE}(112, 7)) + (2 * \text{PULSE}(119, 7))$$

#### NO MISURE RESTRITTIVE

Contact Frequency=

$$(35 * \text{PULSE}(0, 7)) + (34 * \text{PULSE}(7, 7)) + (15 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (45 * \text{PULSE}(28, 7)) + (45 * \text{PULSE}(35, 7)) + (45 * \text{PULSE}(42, 7)) + (55 * \text{PULSE}(49, 7)) + (500 * \text{PULSE}(56, 7)) + (250 * \text{PULSE}(63, 7)) + (550 * \text{PULSE}(70, 7)) + (200 * \text{PULSE}(77, 7)) + (55 * \text{PULSE}(84, 7)) + (37 * \text{PULSE}(91, 7)) + (35 * \text{PULSE}(98, 7)) + (18 * \text{PULSE}(105, 7)) + (15 * \text{PULSE}(112, 7)) + (14 * \text{PULSE}(119, 7))$$



**LOCKDOWN LIGHT**

Contact Frequency=

$$(35 * \text{PULSE}(0, 7)) + (34 * \text{PULSE}(7, 7)) + (15 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (45 * \text{PULSE}(28, 7)) + (45 * \text{PULSE}(35, 7)) + (45 * \text{PULSE}(42, 7)) + (55 * \text{PULSE}(49, 7)) + (500 * \text{PULSE}(56, 7)) + (250 * \text{PULSE}(63, 7)) + (550 * \text{PULSE}(70, 7)) + (200 * \text{PULSE}(77, 7)) + (55 * \text{PULSE}(84, 7)) + (37 * \text{PULSE}(91, 7)) + (35 * \text{PULSE}(98, 7)) + (18 * \text{PULSE}(105, 7)) + (15 * \text{PULSE}(112, 7)) + (14 * \text{PULSE}(119, 7))$$
**GERMANIA****LOCKDOWN**

Contact Frequency=

$$(5 * \text{PULSE}(0, 7)) + (4 * \text{PULSE}(7, 7)) + (5 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (15 * \text{PULSE}(28, 7)) + (25 * \text{PULSE}(35, 7)) + (25 * \text{PULSE}(42, 7)) + (450 * \text{PULSE}(49, 7)) + (55 * \text{PULSE}(56, 7)) + (50 * \text{PULSE}(63, 7)) + (470 * \text{PULSE}(70, 7)) + (170 * \text{PULSE}(77, 7)) + (35 * \text{PULSE}(84, 7)) + (5 * \text{PULSE}(91, 7)) + (4 * \text{PULSE}(98, 7)) + (3 * \text{PULSE}(105, 7)) + (2 * \text{PULSE}(112, 7)) + (1 * \text{PULSE}(119, 7))$$
**NO MISURE RESTRITTIVE**

Contact Frequency=

$$(45 * \text{PULSE}(0, 7)) + (25 * \text{PULSE}(7, 7)) + (25 * \text{PULSE}(14, 7)) + (35 * \text{PULSE}(21, 7)) + (35 * \text{PULSE}(28, 7)) + (45 * \text{PULSE}(35, 7)) + (45 * \text{PULSE}(42, 7)) + (450 * \text{PULSE}(49, 7)) + (58 * \text{PULSE}(56, 7)) + (50 * \text{PULSE}(63, 7)) + (550 * \text{PULSE}(70, 7)) + (210 * \text{PULSE}(77, 7)) + (55 * \text{PULSE}(84, 7)) + (20 * \text{PULSE}(91, 7)) + (18 * \text{PULSE}(98, 7)) + (16 * \text{PULSE}(105, 7)) + (15 * \text{PULSE}(112, 7)) + (14 * \text{PULSE}(119, 7))$$
**LOCKDOWN LIGHT**

Contact Frequency=

$$(5 * \text{PULSE}(0, 7)) + (4 * \text{PULSE}(7, 7)) + (5 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (15 * \text{PULSE}(28, 7)) + (25 * \text{PULSE}(35, 7)) + (35 * \text{PULSE}(42, 7)) + (450 * \text{PULSE}(49, 7)) + (58 * \text{PULSE}(56, 7)) + (65 * \text{PULSE}(63, 7)) + (495 * \text{PULSE}(70, 7)) + (190 * \text{PULSE}(77, 7)) + (65 * \text{PULSE}(84, 7)) + (15 * \text{PULSE}(91, 7)) + (8 * \text{PULSE}(98, 7)) + (6 * \text{PULSE}(105, 7)) + (5 * \text{PULSE}(112, 7)) + (4 * \text{PULSE}(119, 7))$$
**USA****LOCKDOWN**

Contact Frequency=

$$(5 * \text{PULSE}(0, 7)) + (4 * \text{PULSE}(7, 7)) + (5 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (15 * \text{PULSE}(28, 7)) + (35 * \text{PULSE}(35, 7)) + (55 * \text{PULSE}(42, 7)) + (50 * \text{PULSE}(49, 7)) + (50 * \text{PULSE}(56, 7)) + (50 * \text{PULSE}(63, 7)) + (500 * \text{PULSE}(70, 7)) + (200 * \text{PULSE}(77, 7)) + (90 * \text{PULSE}(84, 7)) + (55 * \text{PULSE}(91, 7)) + (10 * \text{PULSE}(98, 7)) + (5 * \text{PULSE}(105, 7)) + (4 * \text{PULSE}(112, 7)) + (3 * \text{PULSE}(119, 7))$$
**NO MISURE RESTRITTIVE**

Contact Frequency=

$$(15 * \text{PULSE}(0, 7)) + (14 * \text{PULSE}(7, 7)) + (5 * \text{PULSE}(14, 7)) + (10 * \text{PULSE}(21, 7)) + (35 * \text{PULSE}(28, 7)) + (55 * \text{PULSE}(35, 7)) + (75 * \text{PULSE}(42, 7)) + (50 * \text{PULSE}(49, 7)) + (50 * \text{PULSE}(56, 7))$$

7))+(50\*PULSE(63, 7))+(550\*PULSE(70, 7))+(250\*PULSE(77, 7))+(96\*PULSE(84,7))+(78\*PULSE(91, 7))+(25\*PULSE(98, 7))+(14\*PULSE(105,7))+(11\*PULSE(112, 7))+(12\*PULSE(119, 7))

## LOCKDOWN LIGHT

Contact Frequency=

(5\*PULSE(0,7))+(4\*PULSE(7,7))+(5\*PULSE(14,7))+(10\*PULSE(21,7))+(15\*PULSE(28,7))+(35\*PULSE(35,7))+(55\*PULSE(42,7))+(50\*PULSE(49, 7))+(50\*PULSE(56, 7))+(50\*PULSE(63, 7))+(550\*PULSE(70, 7))+(240\*PULSE(77, 7))+(92\*PULSE(84,7))+(55\*PULSE(91, 7))+(10\*PULSE(98, 7))+(5\*PULSE(105,7))+(4\*PULSE(112, 7))+(3\*PULSE(119, 7))

# Bibliografia

Abdulmajeeda, K., Adeleke, M. e Popoola, L (2020), *Online forecasting of Covid-19 cases in Nigeria using limited data*, Data in Brief, Giugno, pp. 159-178.

Bass, F. M. (1969), *A new product growth for model consumer durables*, Management Science, vol.15 No.5, pp. 215-227.

Brandimante, P. e Zotteri, G. (2007), *Introduction to distribution Logistic*, Wiley, New York, NY

Cantamessa, M. e Montagna, F. (2006), *Management of Innovation and Product Development: Integrating Business and Technological Perspectives*, Springer, Londra, GB.

Chambers, J. C., Mullick, Satider, K., Smith e Donald, D. (1971), *How to choose the Right Forecasting Technique*, Harvard Business Review, Luglio, pp. 1-25.

Currie, C Fowler, J Kotiadis, K Monks, T and Onggo, B. S. (2020), *How simulation modelling can help reduce the impact of COVID-19*, Journal of Simulation, 15 Aprile, pp. 83-97.

Davidson, P. I. (2000), *Issues in the Design and Use of System-Dynamics-Based Interactive Learning Environments*, Sage Journals, 1 Giugno, vol.31, pp. 170-177.

Forrester, J. W (1969), *Urban Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge, Mass.

Forrester, J. W. (1961), *Industrial Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge, Mass.

Forrester, J. W. (1971), *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge, Mass.

Kalekar, P. S. (2004), *Time series Forecasting using Holt-Winters Exponential Smoothing*, Computer Science, 6 Dicembre, pp. 1-13.

Lazarsfeld, P.F. Berelson, B. and Gaudet, H. (1944), *The People's Choice: How the Voter Makes up His Mind in a Presidential Campaign Duell*, Sloan and Pearce, New York.

Ma, Z., Niu, B., Phan, T.A., StensjØen, A.L., Ene, C., Woodiwiss, T., Wang, T., Holland, E.C., Tian, J.P. (2020), *Stochastic growth pattern of untreated human glioblastomas predicts the survival time for patientstale*, Scientific Reports, 20 Aprile, vol.10.

Rahmandad, H. and Sterman, J.W. (2008), *Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models*, Management Science, Maggio, pp. 998-1014.

Ryan, B. and Gross, N. C. (1943). *The diffusion of hybrid seed corn in two Iowa communities*, Rural Sociology, pp. 15-24.

Sterman, J.D. (2000), *Business Dynamics: System Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, New York, NY.

Sterman, J.D. (2001), *System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World*, California Management Review, vol. 43 No. 4, pp 8-25.

Sterman, J.W. (2007), *Understanding Epidemics Using VensimPLE*, workin paper, MIT Sloan Management, Mass., Autunno.

Winters, P.R. (1960), *Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages*, Management Science, Aprile, pp. 324-342

# Sitografia

- [1] <http://www.salute.gov.it/portale/nuovocoronavirus/>
- [2] <https://it.wikipedia.org/wiki/COVID-19>
- [3] <https://www.epicentro.iss.it/infettive/MersCov2013>
- [4] <https://lab24.ilsole24ore.com/storia-coronavirus/>
- [5] <https://hbr.org/1971/07/how-to-choose-the-right-forecasting-technique>
- [6] <https://core.ac.uk/download/pdf/20258541.pdf>
- [7] <https://www.agendadigitale.eu/cultura-digitale/covid-19/>
- [8] <https://core.ac.uk/download/pdf/20258541.pdf>
- [9] [http://tesi.cab.unipd.it/40116/1/Capozzo\\_Andrea.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/40116/1/Capozzo_Andrea.pdf)
- [10] <https://www.fondazioneveronesi.it/magazine/articoli/cardiologia/covid-19-cosa-sappiamo-sulle-reinfezioni>
- [11] [https://www.researchgate.net/publication/44827001\\_Business\\_Dynamics\\_System\\_Thinking\\_and\\_Modeling\\_for\\_a\\_Complex\\_World](https://www.researchgate.net/publication/44827001_Business_Dynamics_System_Thinking_and_Modeling_for_a_Complex_World)
- [12] <https://lab24.ilsole24ore.com/coronavirus/>
- [13] <https://www.worldometers.info/coronavirus/country/china>
- [14] <https://coronavirus.jhu.edu/covid-19-daily-video>
- [15] [https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200418-sitrep-89-covid-19.pdf?sfvrsn=3643dd38\\_2](https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200418-sitrep-89-covid-19.pdf?sfvrsn=3643dd38_2)
- [16] <https://www.agi.it/economia/news/2020-03-10/coronavirus-anziani-italia-demografia-7420776/>
- [17] [https://www.ansa.it/canale\\_scienza\\_tecnica/notizie/biotech/2020/94/02/il-coronavirus-preferisce-il-freddo-secco\\_01f82ed2.html](https://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/notizie/biotech/2020/94/02/il-coronavirus-preferisce-il-freddo-secco_01f82ed2.html)
- [18] <http://vensim.com/vensim-software/>
- [19] [https://www.corriere.it/esteri/20\\_novembre\\_14/coronavirus-perche-germania-uccide-meno-tre-segreti-modello-merkel-d3d8fb46-25f4-11eb-9464-032251e7abf1.shtml](https://www.corriere.it/esteri/20_novembre_14/coronavirus-perche-germania-uccide-meno-tre-segreti-modello-merkel-d3d8fb46-25f4-11eb-9464-032251e7abf1.shtml)
- [20] <https://aulascienze.scuola.zanichelli.it/come-te-lo-spiego/2020/03/19/la-diffusione-del-contagio-nelle-epidemie-un-modello-matematico/>

- [21] [https://www.corriere.it/salute/malattie\\_infettive/cards/coronavirus-che-cosa-fare-evitare-l-infezione-tutti-sintomi-malattia/che-cosa-succede-se-tocco-superfici-infette.shtml](https://www.corriere.it/salute/malattie_infettive/cards/coronavirus-che-cosa-fare-evitare-l-infezione-tutti-sintomi-malattia/che-cosa-succede-se-tocco-superfici-infette.shtml)
- [22] <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/scambi-contagiati-coordinamento-obbligatorio-25924>
- [23] <https://www.internazionale.it/notizie/hanna-beech/2020/05/05/covid-19-diversita-diffusione-mondo>
- [24] <https://www.agi.it/estero/news/2020-09-20/francia-covid-coronavirus-seconda-onda-contagi-9702119/>

# Ringraziamenti

*“Il meglio deve ancora venire”*, mi è stato ripetuto molte volte durante la mia carriera universitaria, e, ad essere sincera, mi ha sempre rincorata. Oggi finalmente quel giorno tanto sognato è arrivato e io mi sento pronta più che mai ad intraprendere la mia strada, accorrendo a braccia aperte incontro al mio *“meglio”*. Se ripenso al mio primo semestre al Politecnico di Torino ricordo come questo traguardo mi sembrasse lontano, quasi irraggiungibile e mai avrei immaginato di celebrare la fine di questo percorso lontana da amici e parenti, il cui supporto si è rivelato fondamentale in questi cinque anni. Oggi come mai prima, sento la necessità di ringraziare le persone che hanno reso questo possibile.

In primis vorrei ringraziare la Prof.ssa Anna C. Cagliano per avermi proposto il presente progetto e che con paziente disponibilità e gentilezza mi ha aiutata dove ancora le mie capacità non erano sufficienti. Inoltre ringrazio il Prof. Giulio Mangano per i suoi suggerimenti, di cui ho fatto tesoro.

Un ringraziamento alle amiche di sempre, le mie *Chicche*, con cui sono cresciuta, insieme abbiamo condiviso tanti momenti di sincera amicizia. In particolare, ringrazio Angelica per essere una certezza, Elisa per l'amicizia vera che ci lega, Laura per essermi sempre accanto e Marta per condividere con me gli aspetti profondi della vita e allo stesso tempo essere la mia spalla nelle follie.

Un pensiero va a tutti i compagni di corso che ho incontrato lungo il mio percorso, con cui ho condiviso l'agitazione della sessione esami ma anche molto divertimento. Nello specifico ringrazio Marta e Samuela, compagne di studio matto e disperato ma anche di allegre risate e momenti indelebili; a loro penserò sempre con gratitudine per questi meravigliosi anni, senza di loro non sarebbe stato lo stesso.

Ripenso alla mia esperienza universitaria e non può che emergere nella mia mente la collina della Gran Madre, con Villa San Giuseppe, a cui devo molto, soprattutto l'avermi fatto conoscere persone speciali, diventati negli anni gli *“amici di Torino”* di riferimento. Innanzitutto vorrei ringraziare Chiara, con lei ho condiviso il vivere in Villa, amica fidata su cui potrò sempre contare, Alfonso, la cui simpatia ha conquistato i cuori di tutti ed infine un ringraziamento speciale a Fabio, compagno di avventure torinesi e un vero amico. Grazie ai miei *Bischeri*, per aver reso tutto più spensierato e divertente, per avermi preso con voi sotto la vostra ala e fatta sentire come se ci fossi da sempre. A voi devo le serate migliori e le grandi feste ma anche momenti di vera amicizia, vi voglio bene.

Ringrazio la mia amica d'infanzia Luisa, per avermi fatto scoprire la bellezza dell'amicizia, capace di ritrovarsi dopo anni e, al contrario ringrazio Lucia, che nonostante il nostro avvicinamento sia molto recente, sento già molto vicina.

Un ringraziamento agli zii, ai cugini e ai Quazzoletti, che mi sono sempre stati accanto, accarezzandomi nella crescita. Ringrazio Giacomo, Beatrice e Matteo, per essere cresciuti con me e avermi fatta sentire a casa anche a Torino. In particolare Giacomo, con cui ho condiviso larga parte del mio percorso scolastico, tra cui il mio primo anno universitario, senza di lui non sarebbe stato lo stesso.

A Luca, senza cui sarebbe stato tutto molto più difficile. Grazie per essere sempre al mio fianco, per avermi aiutata a vedere le cose da un'altra prospettiva, riuscendo a tramutare altissimi e insormontabili muri in comuni gradini. Grazie per aver vissuto con me questi meravigliosi anni e aver reso tutto indimenticabile.

A Francesco, che con amore non mi ha mai lasciato sola, grazie per essere il mio pilastro ed esempio da seguire.

Ad Andrea, che con la sua allegria contagiosa sa sempre rendere tutto più bello e sollevarmi nei momenti più duri. Grazie per condividere con me così tanto e per essere stato un perfetto coinquilino e compagno di studio.

Alla mia nonnina Vilma, che con le sue “*pietanzine*” domenicali ci ha trasmesso tutto il suo amore e al nonno Vittorio, che sarebbe fiero di me.

Alla mia nonnina Elena, grazie per essere la custode della nostra bellissima famiglia e al nonno Amabile, per avermi trasmesso l'amore per la nostra meravigliosa terra e per i suoi frutti, sono certa che sarai un maestro esemplare nell'introdurmi al tuo mondo.

Ai miei genitori, a cui devo la persona che sono diventata. Grazie per aver sempre creduto nelle mie capacità, molto più di quanto facessi io stessa, grazie per avermi trasmesso l'autostima necessaria e l'ambizione che ci contraddistingue, grazie per avermi mostrato la vostra umanità, la vostra sofferenza, la vostra felicità e la vostra quotidianità, che vi ha reso genitori in grado di condividere la vita con noi, in tutte le sue sfaccettature e non tirandocene fuori, ve ne sarò sempre immensamente grata.

A tutti voi e al nostro “*meglio*”.

Chiara



