

LAVORARE CON I FRATTALI

UNA RISORSA PER I PROFESSIONISTI DELLA
PROGETTAZIONE BIOFILICA

ITALIAN TRANSLATION

UN PROGETTO DI "COST RESTORE ACTION"
CURATO DA RITA TROMBIN
IN COLLABORAZIONE CON



TERRAPIN

BRIGHT GREEN

RINGRAZIAMENTI

Questo toolkit è il risultato di uno sforzo congiunto tra Terrapin Bright Green, Cost RESTORE Action (REthinking Sustainability TOWards a Regenerative Economy), EURAC Research, International Living Future Institute, Living Future Europe e molti altri partner, inclusi professionisti del settore e accademici.

AUTORE

Rita Trombin

SUPERVISORE ED EDITORE

Catherine O. Ryan

COLLABORATORI

Belal Abboushi, Laboratorio nazionale del nord-ovest del Pacifico (PNNL)

Luca Baraldo, COOKFOX Architetti DCP

Bethany Borel, COOKFOX Architetti DCP

Bill Browning, Terrapin Bright Green

Judith Heerwagen, Università di Washington

Giammarco Nalin, Goethe Universität

Kari Pei, Interface

Nikos Salingaros, Università del Texas a San Antonio

Catherine Stolarski, Catherine Stolarski Design

Richard Taylor, Università dell'Oregon

Dakota Walker, Terrapin Bright Green

Emily Winer, International Well Building Institute (IWBI)

CITAZIONE

Rita Trombin (31 December 2020). Working with fractals: a resource for practitioners of biophilic design [Lavorare con i frattali: una risorsa per i professionisti della progettazione biofilica], (R. Trombin e N. Mamone, Italian Trans., 2023). New York: Terrapin Bright Green LLC.



Tradotto in italiano da Rita Trombin e Nicole Mamone nel 2023.

Revisionato gennaio 2021 © 2020 Terrapin Bright Green LLC
PER DOMANDE: rita.trombin@biofilia.net o biophilia@terrapinbg.com

COPERTINA: Catherine O. Ryan

IMMAGINI DI COPERTINA: Cristalli di ghiaccio (snow-603675) di Quartzla da Pixabay;
fiocco di neve in geometria frattale di Catherine Stolarski Design.

PANORAMICA

Il marchio unico della natura per riuscire ad organizzare la sua complessità è sostenuto dai pattern frattali – pattern auto-simili su una gamma di scale di ingrandimento – che si applicano praticamente a qualsiasi dominio della vita. Si ritiene che alcuni pattern frattali stimolino l'esperienza umana in modo positivo, suggerendo una possibile applicazione pratica nell'ambiente costruito. Con il recente aumento di interesse per le geometrie frattali – sia tra i risultati della ricerca sottoposta a *peer-review* sia come attributo di progettazione particolarmente accessibile per architetti e interior designer – Terrapin Bright Green ha individuato la necessità di un documento orientato alla progettazione che affronti i principali punti di apprendimento per i professionisti della progettazione interessati a lavorare con i frattali.

Nel 2014, Terrapin Bright Green ha classificato i frattali sotto il pattern di progettazione biofilica “Complessità e ordine”, per indicare “ricche informazioni sensoriali che aderiscono ad una gerarchia spaziale simile a quelle incontrate in natura” le quali generano recupero dall'affaticamento mentale e dallo stress, maggiore creatività, relax e stimolazione al tempo stesso. Oggi sappiamo che i frattali possono estendersi oltre un singolo pattern per aiutare a caratterizzare la forma, la luce, il suono e persino le caratteristiche spaziali.

Intuizioni di ricerca significative come questa richiedono in media 17 anni prima di entrare nella pratica del settore. Frutto di uno sforzo congiunto tra Terrapin, Cost RESTORE Action, Eurac Research e International Living Future Institute, questo progetto mira ad aiutare a ridurre questo divario. Identificando i dati e le risorse più appropriati, questo lavoro spera di promuovere la comprensione ed il dibattito sui frattali per la loro applicazione diretta da parte della comunità di progettisti, dei settori e delle industrie correlati.

Lo scopo di questo documento (PARTE 1) e del toolkit (PARTE 2) è quello di:

- Apprezzare il valore dei pattern frattali ed incorporarli nei propri progetti.
- Dimostrare che i pattern frattali della natura possono portare benefici significativi per la salute.
- Incoraggiare la selezione di prodotti e materiali con pattern frattali per ottimizzare i benefici associati alla salute.

PARTE 1: L'AMORE PER I FRATTALI

LA STORIA E LA SCIENZA DEI FRATTALI
PER LA SALUTE DELL'AMBIENTE INTERNO

PARTE 2: LAVORARE CON I FRATTALI

UN TOOLKIT PER I PROGETTISTI

PARTE 1

L'AMORE PER I FRATTALI

LA STORIA E LA SCIENZA DEI FRATTALI
PER LA SALUTE DELL'AMBIENTE INTERNO

FLUENZA FRATTALE, UN MARCHIO UNICO DELLA NATURA

DESIGN, ARCHITETTURA E ARTE FRATTALE NELLA STORIA UMANA

I frattali hanno permeato culture che attraversano molti secoli e continenti: l'arte classica e architettura vernacolare, dai capitelli delle colonne dell'antica Grecia, le civiltà egizia, azteca, inca, l'arte degli antichi Maya, templi islamici e indù, Angkor Wat in Cambogia, la Torre Eiffel a Parigi e le strutture di Santiago Calatrava. I frattali sono evidenti anche in opere famose come quelle di Botticelli, Vincent van Gogh e Jackson Pollock. Le loro proprietà visive sono state esplorate anche dai matematici, con la pubblicazione di *The Fractal Geometry of Nature* (1982), in cui Benoit Mandelbrot ha catalogato i frattali statistici della natura e li ha discussi utilizzando metodi matematici per la loro replica.

I frattali costituiscono una componente centrale dell'esperienza umana quotidiana dell'ambiente (Taylor & Spehar, 2016). Mentre ricerche approfondite hanno documentato gli effetti negativi di ambienti che non presentano una ricca varietà estetica esperienziale (Mehaffy & Salingaros, 2015), la proliferazione dei pattern frattali nell'arte e nella progettazione ha continuato a crescere e diversificarsi, creando architetture, interni e prodotti progettati per i bisogni umani (Taylor & Spehar, 2016). Negli ultimi due decenni, team interdisciplinari hanno confermato che le qualità estetiche dei pattern frattali della natura possono indurre effetti sorprendenti sulla salute.¹ La cosa forse più intrigante è che il fascino dei frattali è potenzialmente innato e non appreso, dal momento che è stata riscontrata una preferenza per i frattali in bambini di appena tre anni cresciuti in città (Robles et al., 2020).

1. Esempi di studi includono: Abboushi, Elzeyadi, Taylor & Sereno, 2019; Aks & Sprott, 1996; Albright, 2015; Bies, Blanc-Golhammer, Boydston, Taylor & Sereno, 2016; Cutting & Garvin, 1987; Field & Brady, 1997; Hägerhäll, Purcell & Taylor, 2004; Hägerhäll et al., 2008; Hägerhäll et al., 2015; Geake & Landini, 1997; Juliani, Bies, Boydston, Taylor & Sereno, 2016; Knill, Field & Kersten, 1990; Marlow et al., 2015; Spehar, Clifford, Newell & Taylor, 2003; Smith et al., 2020; Spehar & Taylor, 2013; Spehar et al., 2015; Spehar, Walker & Taylor, 2016; Street et al., 2016; Taylor, 1998, 2002, 2006; Taylor & Spehar, 2016; Taylor & Sprott, 2008; Taylor, Spehar, von Donkelaar & Hägerhäll, 2011; Taylor et al., 2017; e Taylor, Juliani, Bies, Spehar & Sereno, 2018.

FRATTALI COME FENOMENI NATURALI

La natura è caratterizzata da un particolare tipo di geometria statistica, diversa dalla geometria euclidea, chiamata geometria frattale (Mandelbrot, 1982). Gli esseri umani si sono evoluti in ambienti naturali complessi e ricchi di stimoli sensoriali, in cui tutte le strutture naturali sono frattali su una gerarchia di scale, dal grande al microscopico. Attualmente, la maggior parte della popolazione mondiale vive in ambienti urbani costruiti caratterizzati da un'architettura minimalista/euclidea (caratterizzata ad esempio da linee ed angoli retti, piani vuoti, rettangoli, cubi, cilindri, ecc.) la quale si traduce in spazi che non nutrono e rigenerano adeguatamente. Abbondante ricerca in psicologia ambientale suggerisce che gli esseri umani hanno bisogno di scale frattali, ricchi pattern, stratificazione spaziale e geometrie interconnesse tipiche della natura. Da un punto di vista evolutivo potremmo azzardare a supporre che gli esseri umani siano istintivamente attratti dalle caratteristiche frattali dato il loro valore per la sopravvivenza. In un contesto contemporaneo, un buon habitat è quello in cui le persone possono funzionare al loro potenziale ottimale (Kellert & Calabrese, 2015); così, quando il marchio unico della natura, l'equilibrio tra complessità e ordine, viene applicato all'architettura e al design, ne risultano spazi, prodotti e materiali che rigenerano, nutrono e soddisfano.

ENTOMOLOGIA E TASSONOMIA

DEFINIRE I FRATTALI

Il termine frattale deriva dal latino *fractus* che significa "rotto, rompere, frantumare". Il matematico francese Benoit Mandelbrot (1924–2010) ha coniato questo termine come mezzo per descrivere un "pattern senza fine" onnipresente in natura. Il termine è stato suggerito nel libro di Mandelbrot del 1967: *Quanto è Lunga la Costa della Gan Bretagna? Auto-similarità Statistica e Dimensione Frazionaria*, e indica gli ingrandimenti consecutivi di pattern auto-simili.

I frattali sono pattern auto-simili su una gamma di scale di ingrandimento (Fairbanks & Taylor, 2011; Mandelbrot, 1983), che si traducono in stimoli visivi intrinsecamente complessi e organizzati. La **dimensione frattale**, abbreviata in "D", è il parametro che indica la complessità frattale o la gerarchia di scala tra i pattern a diversi ingrandimenti. Questo valore *D* rientra in un intervallo compreso tra 1.1 e 1.9, con $D=1$ e $D=2$ che indicano l'assenza di proprietà frattali. Ad esempio, una linea liscia (che non contiene alcuna struttura frattale) ha un valore *D* pari a 1, mentre un'area completamente riempita (anch'essa non contenente alcuna struttura frattale) ha un valore *D* pari a 2.

FRATTALI STATISTICI ED ESATTI

Data la prevalenza e la varietà dei pattern frattali nella natura, nell'arte e nella scienza, questo documento si concentra su quelli più accessibili per l'applicazione nella progettazione: statistici ed esatti.

I **frattali statistici** ripetono le qualità (cioè densità, ruvidezza, complessità) del pattern su diverse scale con un'apparente casualità nella loro costruzione, rivelando la "firma organica" di progettazione della natura. I **frattali esatti** ripetono uno schema su scale sempre più fini e appaiono esattamente uguali a diversi ingrandimenti, rivelando la precisione di forme esatte e matematiche. Vedi Tabella 1 per la caratterizzazione di questi due tipi di frattali.

PERCHÉ LE PERSONE HANNO BISOGNO DEI FRATTALI

FLUENZA FRATTALE, SALUTE E FASCINO DELLE GEOMETRIE NATURALI

L'esperienza frattale risulta in numerosi benefici quantificabili per la salute, tra cui la riduzione dello stress, il miglioramento del funzionamento cognitivo, l'incremento della creatività e della capacità di risoluzione dei problemi, un maggiore apprezzamento per la natura

TABELLA 1. CARATTERISTICHE DI FRATTALI COMUNI

Aspetto di progettazione	Casualità	Simmetria	Ubiquità in natura	Fluenza frattale	Esempi
STATISTICO	✓		✓	✓	chioma degli alberi, rami, corteccia, nuvole, venature del legno, onde ed affluenti, fuoco, felci
ESATTO		✓		✓	arte geometrica ed ornamentale, come si trova in architettura, tessuti, elementi di paesaggistica in materiale duro (marciapiedi, muri, ringhiere, ecc.)

ed un aumento di emozioni positive (vedi Tabella 2). È stato dimostrato che i benefici dei frattali in particolare, e della natura più in generale, si verificano in pochi minuti, persino secondi (Smith et al., 2020; Lee et al., 2015). Man mano che le persone si trovano sempre più immerse in paesaggi urbani, si disconnettono dai frattali della natura e dalle loro proprietà per la riduzione dello stress. Questo **deficit di natura** può portare ad un malsano accumulo di stress, al senso di assenza di luogo (*placelessness*), e alla sindrome dell'edificio malato (*sick building syndrome*).

La prolungata esposizione allo stress dell'essere umano produce una pletera di conseguenze dannose, come l'aumento della pressione sanguigna, l'esaurimento dell'energia, un aumento del rilascio di ormoni dello stress, la diminuzione delle capacità cognitive e una riduzione della funzione immunitaria. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha dichiarato che lo stress è "l'epidemia sanitaria del 21° secolo" con malattie associate che vanno dalla depressione alla schizofrenia (Smith, 2012). Le malattie legate allo stress costano a paesi come gli Stati Uniti oltre 300 miliardi di dollari (271,1 miliardi di euro; 235,7 miliardi di sterline) ogni anno (Taylor & Spehar, 2016). Nel Regno Unito, la scarsa salute mentale costa ai datori di lavoro fino a 45 miliardi di sterline (51,5 miliardi di euro; 57,2 miliardi di dollari) ogni anno. Tuttavia, per ogni sterlina spesa a sostegno della salute mentale delle persone, i datori di lavoro ricavano 5 sterline (5,75 euro; 6,36 dollari) dal loro investimento attraverso la riduzione del presentismo, dell'assenteismo e del turnover del personale (Franklin, 2020).

Considerando questa crescente preoccupazione come una sfida interdisciplinare, i progettisti che abbracciano l'opportunità di introdurre frattali e altri pattern biofilici nell'habitat umano possono migliorare radicalmente la salute ed il benessere nell'ambiente costruito (Smith et al., 2020).

Proprio come sono strutture frattali le radici e i rami degli alberi, le fessure delle rocce, le venature del legno e gli affluenti dei fiumi, così lo sono anche i polmoni umani, il sistema circolatorio, il cervello, la pelle e così via. Si teorizza che nel corso dell'evoluzione, la prevalenza in natura di pattern frattali statistici di media complessità ($D= 1.3-1.5$) abbia svolto un ruolo critico nel guidare il sistema nervoso umano ad adattarsi e ad elaborarli in modo efficiente con davvero poco sforzo cognitivo (Aks & Sprott, 1996; Taylor et al., 2011; Albright, 2015; Taylor & Spehar, 2016; Taylor et al., 2018). Analogamente alla fluenza linguistica, questa capacità di rilevare e comprendere i pattern frattali in modo accurato e senza

sforzo viene definita **fluenza frattale**. Diversi esperimenti comportamentali (ad es., Robles et al., 2020; Taylor et al., 2018; Taylor & Spehar, 2016; Hägerhäll et al., 2008, 2015), insieme a tecniche qEEG e fMRI, hanno studiato questa mancanza di sforzo nell'elaborazione mentale di pattern frattali statistici di media complessità.

Avere la capacità di cogliere il complesso senso dell'ordine della natura (Gombrich, 1984) porta il vantaggio di riuscire a riallocare in modo fluido l'energia cognitiva per elaborare stimoli più nuovi da cui dipende la sopravvivenza umana, come attraversare in sicurezza una strada o risolvere un nuovo problema. Una preferenza visiva positiva o un'attrazione estetica per i frattali rispetto ai semplici schemi euclidei si riscontra nel 95% delle persone (Taylor, 1998), ed è dovuta alla facilità con cui i frattali sono elaborati.

I progettisti, intuitivamente o per formazione, tendono a creare pattern frattali esatti/geometrici piuttosto che statistici/organici. Gli ambienti che sono risultati essere non-curativi non hanno relazioni di ridimensionamento frattale, e possono essere troppo austeri o euclidei per generare una risposta positiva biofilica sulla salute. Al contrario, questi ambienti possono essere fonte di stress, ansia e comportamenti depressivi, che conducono nel lungo termine a patologie nei propri residenti ed utenti (Salingaros, 2012). La ripetizione di linee in schemi colineari, curvilinei, paralleli e radiali nella progettazione, facilita la percezione visiva attingendo al sistema neuronale altamente organizzato per rappresentare l'orientamento dei contorni (Albright, 2015). Indipendentemente dal fatto che l'estetica frattale sia generata dalla natura, dalla matematica o dall'arte, la preferenza per i frattali statistici di media complessità rimane universale (Spehar et al., 2003).

PARAMETRI DI PREFERENZA FRATTALE

La preferenza universale per i frattali "statistici" culmina ad un grado di complessità da basso a moderato, mentre la preferenza universale per i frattali "esatti" culmina ad una maggiore complessità. L'alto livello di simmetria nei frattali esatti consente una maggiore tolleranza per la complessità visiva rispetto ai frattali statistici (Abboushi et al., 2019). Quattro fattori influenzano la preferenza nei frattali:

1. Dimensione frattale (D)
2. Simmetria
3. Ricorsione
4. Numero di elementi introdotti ad ogni ricorsione

Dimensione frattale. La semplicità euclidea e la simmetria dei frattali esatti aumentano la tolleranza ed il picco di preferenza a complessità medio-alta nei frattali esatti ($D= 1.5-1.7$) (Abboushi et al., 2019). L'esperienza di frattali esatti con complessità medio-alta induce preferenza visiva e un miglioramento dell'umore, in particolare negli spazi interni euclidei meno complessi (Abboushi et al., 2019; Taylor et al., 2018).

Quando si sperimentano pattern frattali complessi in uno spazio interno a bassa complessità, la preferenza visiva può spostarsi sui valori D più alti (da 1.5 a 1.7, intervallo medio-alto) disponibili nello spazio, suggerendo che un ambiente a bassa complessità consente una tolleranza ed una preferenza per frattali statistici di maggiore complessità, come quelli che si trovano nelle opere d'arte o i pattern di luce proiettati all'interno di quello spazio (Abboushi et al., 2019). Un buon esempio di questo scenario sono i musei composti da stanze geometriche e pareti bianche adornate con opere d'arte altamente complesse in grado di affascinare.

Simmetria. I pattern caratterizzati da simmetria e geometria, come quelli comuni tra i frattali esatti, possono risultare visivamente accattivanti in quanto bilanciano interesse e comprensibilità. La simmetria speculare (o a specchio) è generalmente considerata uno dei fattori più predittivi nel giudizio del bello su un pattern geometrico. Una mancanza di simmetria radiale e speculare può essere superata includendo più ricorsione e aumentando la dimensione frattale.

L'ordine e la precisione dei frattali esatti consentono a un pattern di utilizzare al massimo lo spazio in una particolare dimensione, mantenendo al contempo la sua eleganza. Questo equilibrio tra l'utilizzo efficiente dello spazio e l'estetica visiva è uno dei motivi per cui i frattali sono così affascinanti e utili in vari contesti. Piastrelle e tappeti a motivi geometrici, carta da parati e tessuti, manufatti e ornamenti trovati in molte culture (Eglash, 2002) sono la prova di questo ordine e simmetria spaziale.

Ricorsione. I frattali generati da una regola di suddivisione finita hanno una sorprendente somiglianza sia con la natura che con gli ornamenti umani. In matematica, la regola di suddivisione finita è un modo ricorsivo di dividere un poligono o un'altra forma bidimensionale in pezzi gradualmente più piccoli. In un certo senso, le regole di suddivisione sono generalizzazioni di frattali esatti regolari. Invece di ripetere esattamente lo stesso pattern più e più volte, hanno lievi variazioni in ogni fase, consentendo una struttura più ricca pur mantenendo lo stile elegante dei frattali (Cannon, et al., 2001).

TECNOLOGIA E DIREZIONI FUTURE

SOFTWARE E ALTRI STRUMENTI DI SETTORE PER LA PROGETTAZIONE FRATTALE

A partire dagli anni '80 architetti e designer hanno iniziato ad utilizzare la tecnologia informatica per analizzare e simulare la complessità osservata in natura e applicarla alle forme strutturali degli edifici ed ai pattern organizzativi urbani. Sia dal punto di vista della progettazione che dell'esperienza, ogni settore ha requisiti di strumentazione diversi e tecnologie appropriate. Inoltre, per ogni settore potrebbero

CURIOSITÀ SUI FRATTALI

1 Perché identificare somiglianze familiari nelle nuvole è un passatempo così onnipresente? I nostri processi di riconoscimento di pattern sono così potenziati da quelli frattali delle nuvole che il nostro sistema visivo interno ha un "innesco di felicità", risultando nell'immaginazione di forme che in realtà non sono presenti (Taylor & Spehar, 2016).

2 La ricerca pionieristica sulle proprietà di riduzione dello stress dei frattali è stata finanziata dalla NASA con l'obiettivo di preservare la salute degli astronauti durante le lunghe missioni lontano dal pianeta terra (Taylor, 2006). Come possiamo progettare con geometrie frattali a beneficio dei terranauti di tutti i giorni?

3 Gli animali foraggiano naturalmente il cibo secondo un pattern frattale (Viswanathan et al., 1996). Ad esempio, le traiettorie brevi consentono ad un uccello di cercare cibo in una piccola regione, per poi volare nelle regioni vicine e poi in regioni ancora più lontane, consentendo ricerche efficienti su più scale. L'occhio umano adotta lo stesso movimento quando cerca informazioni visive nello spazio.

4 Una delle prime descrizioni conosciute dei pattern frattali in natura proviene dal grande artista e scienziato Leonardo da Vinci: "Tutti i rami di un albero in ogni fase della sua altezza se sommati hanno lo stesso spessore del tronco [sotto di loro]." Nel XV secolo da Vinci ipotizzò una relazione logica tra i rami degli alberi a diverse altezze, in base ai loro volumi.

esserci diverse opportunità e metodi per integrare i pattern frattali nella propria progettazione. Le persone sperimentano lo spazio come un equilibrio di tutti i suoi elementi, quindi quando si implementano pattern frattali è fondamentale tenere conto del contesto nel suo insieme. In conclusione, la preferenza individuale determinerà quale sarà la migliore applicazione dei pattern frattali per soddisfare i bisogni individuali.

Grasshopper (Rhinoceros 3D) è più facilmente accessibile ai progettisti per la progettazione parametrica (o algoritmica). Presenta un'interfaccia di linguaggio con programmazione visiva per creare e modificare geometrie. *Fractals* è un plug-in che consente agli utenti di creare tre diversi tipi di pattern frattali generati matematicamente. Può essere sfruttato per determinare se un'immagine o un progetto possiede qualità frattali e contribuire ad una strategia di progettazione iterativa.

Altri software possono produrre forme 2D e 3D basate sulla progettazione frattale. Alcuni di questi sono: Mandelbulber, Mandelbulb3D, ChaosPro, Fractal Zplot, QuaSZ, Fractal ViZion, Fractal Scope, Ultra Fractal, Apophysis, Fractal Science Kit, Incendia Fractals, Fractal Extreme. Questi programmi, spesso utilizzati da designer che lavorano con l'arte digitale, consentono di aumentare la complessità di diverse forme, basandosi sui principi frattali, offrendo opzioni di rendering, colorazione, illuminazione e animazione di alta qualità.

Gli script di MATLAB per la creazione e l'analisi dei frattali sono ancora agli albori e relativamente inaccessibili al professionista comune. La tecnica box-counting di MATLAB è la più utilizzata per l'analisi della complessità frattale (valore di D). Questa tecnica è affidabile e robusta in particolare con figure frattali computate ed è utile per quantificare la dimensione topologica delle immagini, calcolando quindi i loro valori D (cioè approssimativamente quanto l'immagine è frattale). È importante sottolineare che questo valore frattale D può variare in base a diversi parametri, come la risoluzione dell'immagine e la soglia per la digitalizzazione. In altre parole, il metodo del *box-counting* può fornire un resoconto estetico, ma non assoluto, dell'esperienza frattale dell'immagine stessa.

La realtà virtuale può essere utilizzata per testare la navigazione e la preferenza visiva in spazi con elementi di progettazione frattale (Juliani et al., 2016). Questo approccio può essere utilizzato dai progettisti per testare l'esperienza di "essere nello spazio". Abbinato a tecniche qEEG (Hägerhäll et al., 2008) consente di valutare

l'attivazione cerebrale mentre ci si sposta nello spazio (ad es., se un pattern attiva uno stato di rilassamento o di eccitazione). L'eye tracking viene utilizzato anche per testare: quanto tempo impiega un elemento per catturare l'attenzione (tempo alla prima fissazione), per quanto tempo mantiene l'attenzione (tempo di fissazione) e quante volte l'attenzione viene spostata per tornare su di esso (rivisita). Anche la dimensione della pupilla può essere monitorata poiché questo cambia in base al grado di stimolazione.

Grazie ai rapidi progressi nelle tecnologie di stampa in 3D, i pattern complessi possono essere stampati (contour-crafted ovvero creati seguendo i contorni) come oggetti fisici. In futuro, le stampanti tridimensionali saranno in grado di stampare intere stanze, consentendo il loro assemblaggio in edifici, rendendo l'architettura frattale una proposta pratica (Taylor et al., 2018).

PRO E CONTRO DEI FRATTALI GENERATI TECNOLOGICAMENTE

Lo scripting o elaborazione con software consente una rapida generazione di pattern e facilita la ripetizione per confermare la direzione da prendere in un progetto attraverso replica e test.

La connessione, la sensibilità e l'intuizione dei pattern disegnati a mano potrebbero andare persi con lo *scripting*. Computer e stampanti non possono replicare completamente le esperienze multisensoriali umane di un vento vorticoso, del caldo di un fuoco scoppiettante e dello sciabordio delle onde.

Sebbene i computer possano riempire i mondi virtuali con ricchi pattern frattali, nel mondo fisico questi sono quasi esclusivamente il "marchio di fabbrica" della natura (Taylor et al., 2018). Per rimanere in linea con i concetti della biofilia, è sconsigliato il perseguimento di un approccio puramente matematico o tecnologico.

Inoltre, la fluenza e le dimensioni frattali possono offrire la metrica numerica conveniente per progettisti e ingegneri, in particolare quando si sviluppano frattali mirati all'apporto di benefici per la salute umana come nel caso dei "green buildings". Potrebbe essere prematuro considerare questi valori nei sistemi di valutazione dei green buildings, ma se la natura è frattale nella sua totalità, è concepibile che un giorno anche i nostri edifici possano esserlo. I software potrebbero essere la chiave per rendere tutto ciò fattibile, ma non esiste una soluzione risolutiva per la tecnologia di progettazione frattale.

RICERCA FUTURA

Tra le ricerche disponibili, pochi studi hanno preso in considerazione nei propri dati l'ambiente dell'utente. Uno studio degno di nota ha suggerito che avere una vista di qualità sulla natura può annullare il valore o l'obiettivo di una progettazione frattale creata dall'essere umano (Abboushi et al., 2018). La ricerca che limita lo studio ai pattern frattali visualizzati sullo schermo di un computer situato direttamente di fronte ai partecipanti può essere tradotta nell'ambiente interno, ma non è sufficiente per comprendere la risposta umana ai frattali quando il contesto ed i fattori esterni (ad es., la vista, la luce diurna) non sono considerati. Sono necessarie ulteriori ricerche sull'esperienza frattale in una varietà di ambienti quotidiani e diverse domande meritano di essere esplorate.

1. In che misura differisce la preferenza frattale tra i paesaggi naturali e l'ambiente costruito o, in altre parole, quali fattori dell'ambiente costruito cambiano le preferenze per la complessità frattale?

2. Da un punto di vista sanitario ed esperienziale, quali sono i punti critici dell'ambiente costruito in cui un intervento frattale è più desiderabile, come una sorta di "agopuntura urbana", o non necessario – come quando

una vista di natura di qualità prevale su un pattern frattale ingegnerizzato tecnologicamente?

3. Con la proliferazione di dispositivi portatili smart e l'aumento dei 'citizen scientists' ovvero dei cittadini scienziati, potrebbe essere uno sforzo realistico e utile sviluppare un'app (ad es., con un codice QR) per scansionare e analizzare le qualità frattali dei pattern che incontriamo nella progettazione? I dati raccolti potrebbero essere catalogati e utilizzati dai progettisti per restringere la selezione di materiali da includere in un progetto. Oppure un simile catalogo di pattern, preferenze e dimensioni frattali calcolate incoraggerebbe una fissazione "innaturale" sui dettagli?

4. In che modo le pratiche modulari e prefabbricate possono supportare la costruibilità dei frattali a livello di edificio? Quale ruolo potrebbe svolgere la tecnologia nel garantire che la crescita urbana sia frattale a livello di pianificazione urbana?

Queste e altre indagini di ricerca aiuterebbero diversi settori a comprendere il valore e le priorità dei frattali sulla salute e il benessere nell'ambiente costruito.

PARTE 2

LAVORARE CON I FRATTALI

UN TOOLKIT PER I PROGETTISTI

Per millenni gli esseri umani hanno utilizzato intuitivamente pattern frattali complessi, nel design e nell'architettura. Eppure, per gran parte del secolo scorso, gli spazi costruiti sono stati progettati con forme neutre e geometriche.

Solo dall'inizio di questo secolo la scienza è stata utilizzata per dimostrare come le qualità dei pattern frattali in natura possano avere un impatto positivo sulla percezione umana, sulla salute, sulle prestazioni cognitive, sulle emozioni e sullo stress. L'evidenza scientifica viene oggi sfruttata per aiutare a guidare la creazione di prodotti, spazi costruiti ed esperienze che siano salutari, belle e coinvolgenti.

Questo toolkit fornisce un quadro concettuale di alto livello per pensare alla progettazione con i frattali in modo che promuova ambienti interni rigenerativi e soddisfacenti. Questo toolkit include sette risorse:

- Definizione dei frattali
- Rapporto umano con i frattali
- Basi scientifiche
- 8 approfondimenti per la progettazione biofilica frattale
- Applicazioni di progettazione biofilica frattale
- Caso studio di scuole biofiliche
- Appendice: Letture consigliate e Bibliografia

Per i progettisti che hanno familiarità con l'uso dei frattali, questa risorsa offre un lessico per parlarne e la scienza per supportarne un'adozione più ampia.

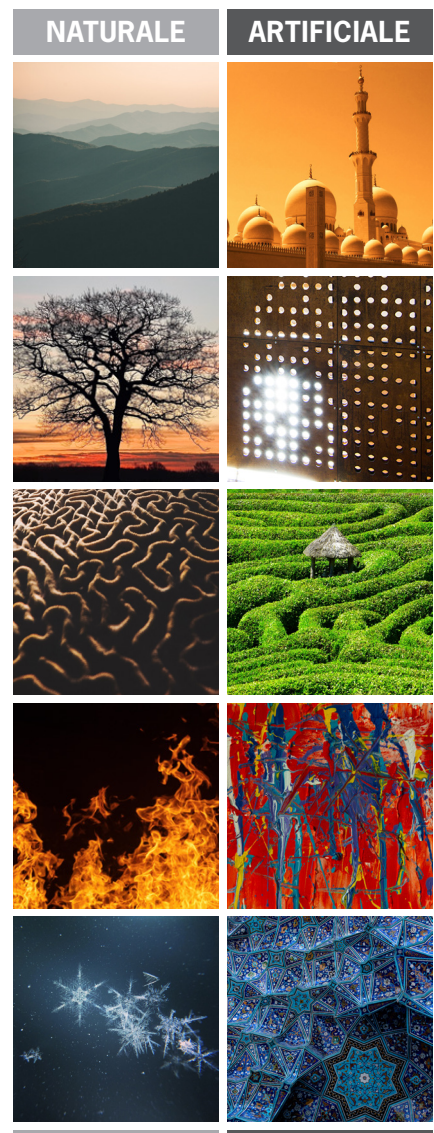


FIGURA 1. Con una comprensione generale dei frattali, diventa facile identificare i parallelismi tra i disegni naturali e quelli creati dall'essere umano. Foto per gentile concessione di Pixabay.



OSSERVA IL TUO AMBIENTE CON SGUARDO CRITICO

- Nel tuo ambiente quotidiano, cerca di identificare dove si verificano istanze di frattali statistici ed esatti: ricercoli a casa, quando vai al lavoro, in ufficio, nei tuoi progetti, o mentre sei al supermercato o al parco.
- Le istanze di frattali sono più prominenti in qualcuno di questi luoghi?
- Quali spazi o luoghi nella tua esperienza quotidiana potrebbero potenzialmente trarre beneficio da pattern frattali?
- In che modo questa consapevolezza potrebbe influenzare il tuo approccio nella progettazione?



DEFINIZIONE DEI FRATTALI

- I frattali sono pattern auto-simili su una gerarchia a scala crescente. Possono essere caratterizzati come statistici o esatti. I frattali statistici si trovano in natura, mostrandone la casualità e la tipica “firma organica”. I frattali esatti sono creati dagli esseri umani e sono caratterizzati da precisione, simmetria e replica in scala.
- La dimensione frattale (D) o complessità frattale, indica la gerarchia di scala tra i pattern. Questo valore D può variare da 1.1 a 1.9 ($D=1$ e $D=2$ indicano un’assenza di proprietà frattali).
- I frattali sono onnipresenti in natura. La loro complessità organizzata consente il verificarsi di numerosi processi complessi sia in natura che all’interno del corpo umano.
- Fino a poco tempo fa, i pattern frattali sono stati utilizzati con grande frequenza nel design, nell’architettura e nell’arte. Gli spazi di costruzione moderna, tuttavia, tendono ad essere eccessivamente semplificati ed euclidei o apertamente complicati e disordinati, condizioni entrambe note per indurre stress.

FIGURA 2. I frattali statistici presenti in natura sono uno dei motivi per cui le cascate, vissute da vicino o da lontano, catturano e mantengono così facilmente ed a lungo la nostra attenzione. Credito fotografico: Marcelo Irigoyen, Unsplash.

RAPPORTO UMANO CON I FRATTALI

- Gli esseri umani si sono evoluti per prosperare in ambienti frattali complessi ma coerenti. Analogamente alla fluenza linguistica, la fluenza frattale è la capacità umana di rilevare e comprendere i pattern frattali in modo semplice ed accurato. Inoltre, percepiamo gli ambienti frattali come quelli aventi il più alto valore estetico.
- La preferenza visiva universale è per i frattali di media complessità ($D=1.3-1.7$).
- I frattali possono avere benefici per la salute quantificabili in termini di riduzione dello stress, prestazioni cognitive, creatività, risoluzione dei problemi, umore e navigazione. Vedi la Tabella 2 per un riepilogo generale dei benefici per la salute associati ai pattern frattali.

BASI SCIENTIFICHE

Esiste un'ampia ricerca sui frattali, ma questi studi selezionati si concentrano sulle diverse risposte della salute umana a fronte dell'esperienza frattale nell'ambiente fisico e dalla prospettiva (percezione) umana.

RIDUZIONE DELLO STRESS	PRESTAZIONI COGNITIVE	EMOZIONI, UMORE & PREFERENZE
<p>Riduzione dello stress fino al 60% ed impatto positivo sulla frequenza cardiaca, sulla pressione sanguigna e sulle risposte galvaniche della pelle, in particolare per i frattali statistici TAYLOR, 2006; JOYE, 2007</p>	<p>Stato di vigilanza indotto; maggiore capacità di concentrazione e mantenimento dell'attenzione (in particolare per i frattali $D=1.3$; picco nella risposta beta nell'area parietale) HÄGERHÄLL ET AL., 2008, 2015</p>	<p>Abilità e facilità maggiori nella navigazione nell'ambiente; vivibilità e vitalità JULIANI ET AL., 2016; MEHAFFY & SALINGAROS, 2015</p>
<p>Esperienza indotta di riduzione dello stress, rigenerazione, stato di veglia rilassato. Rilassamento profondo, daydreaming (sognare ad occhi aperti) e stato di meditazione leggera (in particolare per i frattali statistici $D=1.3$; picco nella risposta alfa nei lobi frontali) TAYLOR ET AL., 2016, 2017; HÄGERHÄLL ET AL., 2008, 2015</p>	<p>"Vista senza sforzo" caratterizzata da un maggiore coinvolgimento e da una concentrazione prolungata SMITH ET AL., 2020</p>	<p>Equilibrio tra rilassamento ed eccitazione, soprattutto rispetto ai pattern euclidei ABBOUSHI ET AL., 2019</p>
	<p>Sforzo cognitivo ridotto JULIANI ET AL., 2016</p>	<p>Aumento della preferenza visiva e delle prestazioni, indipendentemente dal metodo di generazione (ovvero tra frattali naturali, generati dal computer o dall'essere umano) TAYLOR ET AL., 2018; TAYLOR & SPEHAR, 2016; SPEHAR ET AL., 2015; SALINGAROS, 2012; HÄGERHÄLL ET AL., 2004; SPEHAR ET AL., 2003; TAYLOR, 1998; AKS & SPROTT, 1996</p>
	<p>Aumento delle capacità di riconoscimento dei pattern TAYLOR ET AL., 2018, 2017A, 2017B</p>	
	<p>Miglioramento delle prestazioni nei compiti visivi TAYLOR & SPEHAR, 2016; TAYLOR ET AL., 2018</p>	

TABELLA 2. Riepilogo dei benefici per la salute associati ai pattern frattali di media complessità. I risultati provengono principalmente dalle prime ricerche svolte su schermi digitali.



FIGURA 3. Blue Ridge Pastures, di Gary R. Huber di 3D Nature LLC, è un paesaggio frattale generato al computer (CC BY-SA 2.5).

8 APPROFONDIMENTI PER LA PROGETTAZIONE BIOFILICA FRATTALE

Come regola generale, quando si introducono pattern frattali nel processo di progettazione, è importante entrare in empatia, definire, prototipare e testare in equipe con gli altri membri del team ed il cliente. Durante questo processo, tieni in considerazione i seguenti otto punti che potrebbero influenzare la direzione del tuo progetto.

Prova a combinare la tua recente comprensione dei frattali con quella della progettazione biofilica. Per ulteriori informazioni sulla scienza, le opportunità e gli impatti sulla salute della progettazione biofilica, vedi *I 14 Pattern della Progettazione Biofilica* (Browning et al., 2014; Traduzione in italiano: Trombin et al., 2023) e *Nature Inside, A Biophilic Design Guide* (Browning & Ryan, 2020).

1. CONSENTI L'ACCESSO ALLA NATURA LOCALE

La migliore guida progettuale per l'incorporazione dei frattali può essere quella di supportare l'accesso visivo e fisico agli spazi esterni ed alle esperienze in cui i frattali statistici si verificano naturalmente. Secondariamente all'accesso immediato, la strategia da mettere in atto è quella di valutare quali caratteristiche preesistenti del sito possono essere "prese in prestito" per l'integrazione (ad es., luce diurna, viste) o di ispirazione (ad es., pattern di materiali naturali, sequenze).

2. IDENTIFICA PRIORITÀ E COMPETENZE

Determina quale problema la soluzione di progettazione frattale si propone di risolvere. Metti in discussione la tua narrativa esperienziale e come i frattali aiutano a raccontare la storia della progettazione. Decidi se il perseguimento di un pattern di progettazione basato sulla scienza è essenziale per gli obiettivi esperienziali e i messaggi che il tuo progetto vuole esprimere.

- Se non essenziale, l'intuizione e gli altri approfondimenti elencati qui rappresentano buoni passi successivi.
- Se essenziale, lavora con ricercatori che possono fornire indicazioni, metriche e metodi specifici per sviluppare e testare soluzioni appropriate di progettazione frattale.

3. CREA PER UN'ATTRAZIONE UNIVERSALE

Se crei frattali statistici o esatti, scegli un intervallo medio di complessità ($D=1.3-1.7$) per massimizzare la preferenza visiva. Tieni a mente che gli estremi frattali (D basso= $1.1-1.2$ o D alto= $1.8-1.9$) possono essere inutili o potenzialmente dannosi per determinati gruppi di utenti. Questo approccio è applicabile alla maggior parte dei progetti, indipendentemente dal metodo di generazione.

4. ERRA DALLA PARTE DELLA CAUTELA E DELLA SEMPLICITÀ

Considerato che sperimentiamo lo spazio nella sua interezza, una caratteristica o un prodotto di design frattale sarà percepito in modo diverso da solo rispetto a quando viene inserito nel suo contesto finale. Pertanto, l'obiettivo può essere quello di introdurre una maggiore complessità in uno spazio minimalista o aggiungere ordine ad un'esperienza già complessa. Sii cauto con l'implementazione di

FRATTALI ESATTI

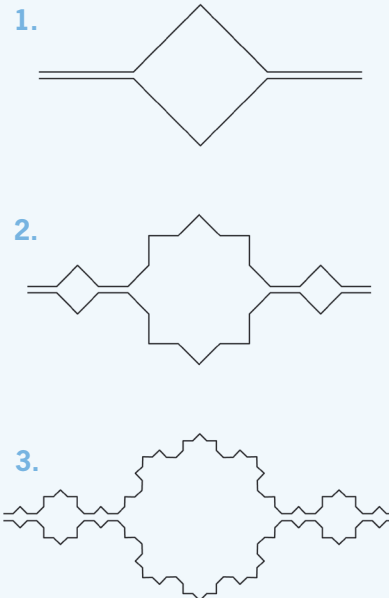


FIGURA 4. Ad ogni ricorsione il frattale aumenta la sua somiglianza sia con la natura che con l'ornamento creato dall'essere umano.



FIGURA 5. Le piume degli uccelli sono riccamente biofiliche e frattali. Quando portate nel design, le applicazioni accurate che vi si ispirano possono ravvivare uno spazio, aggiungere una componente di fascino e ispirazione. L'eccessivo utilizzo (ad es., quantità o stratificazione) può avere un vertiginoso effetto moiré noto come "tossicità visiva". Credito fotografico: David Clode, Unsplash.

frattali: l'eccessiva indulgenza a volte può risultare in interferenze visive, come i pattern moiré, che di solito vanno contro l'obiettivo esperienziale.

5. PROGETTA A MISURA DI PERSONE

La distanza di visualizzazione ed il tempo di esposizione non influenzano in modo significativo la preferenza visiva per la complessità frattale. Adattare la progettazione all'esperienza umana e mantenere un equilibrio con altri fattori determinanti l'estetica o l'esperienza del design giocherà un ruolo importante nel successo esperienziale della soluzione progettuale.

Ad esempio, la scala di frattali su dei pannelli a parete in un ascensore sarà diversa dalla scala delle opere d'arte frattali sospese in un atrio di 10 piani. Sembra intuitivo, ma a volte viene trascurato nel processo di progettazione: i frattali possono essere visti ed apprezzati dai punti di osservazione primari?

6. POSIZIONA PER UN IMPATTO OTTIMALE

L'impatto esperienziale dei pattern frattali può verificarsi entro pochi minuti o secondi dall'esposizione. Prendi in considerazione l'idea di posizionare le progettazioni con i frattali in luoghi in cui la maggior parte delle persone ne trarrà beneficio e dove si desiderano risultati rilevanti per la salute, anche se non monitorati o misurati.

7. PROGETTA UN'ESPERIENZA MULTISENSORIALE

Nonostante questo toolkit si concentri sull'esperienza visiva, i pattern frattali possono anche essere tattili e uditivi; continui, temporali ed effimeri; esperienze spaziali ed organizzative. Sebbene la ricerca sui frattali multisensoriali sia rara, esistono numerose evidenze che indicano come le esperienze multisensoriali della natura producano una risposta dell'utente più significativa rispetto al coinvolgimento di un singolo senso.

8. INIZIA CON LA NATURA PRIMA DELLA TECNOLOGIA

I software per i computer possono riempire i mondi virtuali con ricchi schemi frattali, ma nel mondo fisico i frattali statistici sono quasi esclusivamente il marchio di fabbrica unico della natura. Computer e stampanti non possono replicare completamente le esperienze multisensoriali umane di un vento vorticoso, del caldo di un fuoco scoppiettante e dello sciabordio delle onde.

I processi automatizzati senza un'adeguata analisi scientifica corrono anche il rischio di generare valori D errati o pattern non frattali che spesso vengono erroneamente ritenuti di qualità frattale valida. Pertanto, l'esclusivo perseguimento di approcci matematici o tecnologici per la generazione di pattern frattali non è raccomandato.

Anche quando si prevede che una soluzione tecnologica sia necessaria per la progettazione, la connessione con la natura sarà più profonda e intuitiva quando la sfida della progettazione viene in primis affrontata con l'esplorazione attiva della natura, seguita dalla realizzazione di schizzi a mano o dall'uso di modell. Lo *scripting* con software supporta quindi la generazione rapida di pattern e facilita la ripetizione per confermare la direzione da prendere. Introdurre un certo grado di casualità nello *scripting* aiuterà anche a mantenere la percezione che il pattern abbia origine naturale.

APPLICAZIONI PER FRATTALI BIOFILICI

- Geometrie architettoniche
- Componenti architettoniche (*divisori, materiali acustici, ringhiere, componenti in legno, componenti in metallo*)
- Finestre (*montanti, vetri, alette, pellicole*)
- Materiali (*legno, pietra, piastrelle*)
- Progettazione tessile (*moquette, tappezzeria, carta da parati*)
- Progettazione con materiale metallico (*grate, griglie, pannelli*)
- Progettazione grafica ambientale (*grafica a muro, decalcomanie*)
- Progettazione di luci e ombre
- Forma del prodotto (*mobili*)
- Arte e scultura
- Planimetria, navigazione spaziale
- Linea del tetto
- Gerarchia stradale, pattern di crescita urbana
- Giochi d'acqua
- Paesaggio sonoro e sensoriale (*flusso dell'acqua, canto degli uccelli, aromi*)
- Paesaggio (*interni, esterni, opere d'arte*)

APPLICAZIONI DI PROGETTAZIONE BIOFILICA FRATTALE

PAVIMENTI TESSILI MOHAWK E INTERFACE

Approccio collaborativo tra scienza e progettazione: Mohawk ha adottato un approccio interdisciplinare alla progettazione frattale, coinvolgendo Anastasija e Martin Lesjak di 13&9 Design e lo scienziato Richard Taylor del Fractals Research e dell'Università dell'Oregon. La loro collaborazione ha prodotto "Relaxing Floors", pavimento tessile basato su frattali statistici di complessità media ($D= 1.3-1.5$), perfezionati da software specializzati nella generazione di pattern con parametri noti per avere una preferenza visiva universale e per generare una riduzione dello stress.

L'approccio interpretativo: il team di progettazione di Interface, guidato da David Oakey, ha iniziato il processo creativo astruendo la natura. Il risultato è stato il design della pavimentazione tessile e modulare "Urban Retreat", analoga al muschio ed alle pietre del selciato, che comunica visivamente una transizione da una zona all'altra. Sebbene gli approcci siano distinti, questi pattern sono entrambi grandi esempi di progettazione biofilica frattale.

FIGURA A. (1) "Relaxing Floors" di 13&9 Design in collaborazione con Fractals Research per Gruppo Mohawk, foto © Sandra Mulder; (2) "Urban Retreat" di Interface®.



1



2

SALA PROTOTIPO WESTIN GEN 5

Nel ripensare ciò che dovrebbe generare l'esperienza delle camere del Westin Hotel, il team di progettazione ha voluto utilizzare un approccio olistico in linea con il proprio marchio di benessere. La strategia di illuminazione doveva essere sia efficacemente circadiana che esperienzialmente coinvolgente. Il loro caratteristico pannello luminoso sul soffitto è stato intenzionalmente progettato per assomigliare alla parte inferiore protettiva e avvolgente della chioma di un albero. Le perforazioni frattali contribuiscono a creare un'esperienza di natura dinamica e memorabile, unica di Westin.

FIGURA B. (a) ispirazione; (b) output del design frattale; (c) prototipo di camera al Westin Hotel con piano di illuminazione frattale. Immagine per gentile concessione di Marriott International.



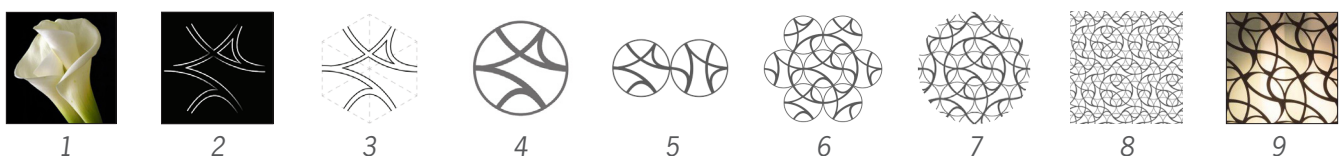
25 PARK ROW, NEW YORK CITY

La complessità e l'ordine della facciata – con una gerarchia a più livelli di finestre e montanti – sono fondamentali per l'esperienza estetica e abitativa di questo grattacielo di Lower Manhattan. I telai delle finestre ed i balconcini sono stati intenzionalmente progettati come un frattale esatto, estratto dai contorni di un fiore di calla. Mentre la trama frattale aggiunge una componente ornamentale alla facciata dell'edificio, la sua esperienza dall'interno dello spazio ed i giochi dinamici di luci e ombre naturali si esprimono in modo unico ed in continua evoluzione durante il giorno e l'anno.

FIGURA C. (1) ispirazione; (2–8) processo iterativo di progettazione frattale; (9) output di produzione; (10) trama installata al 25 Park Row, New York City. Immagini per gentile concessione di COOKFOX Architetti DCP.



10



CASO STUDIO DI SCUOLE BIOFILICHE

PROGETTAZIONE FRATTALE ALLA GREEN STREET ACADEMY



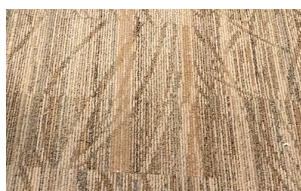
Questo progetto rappresenta la prima ricerca volta ad indagare gli impatti di uno spazio educativo urbano potenziato dalla biofilia sui risultati dell'apprendimento matematico in studenti delle scuole medie (Baltimora occidentale, Stati Uniti). Lo studio presenta i risultati dei dati raccolti in una classe di controllo e in una classe biofilica. Questi hanno mostrato che gli studenti della classe biofilica erano meno stressati rispetto agli studenti della classe di controllo e che i loro punteggi nei test erano tre volte superiori rispetto a quelli degli studenti che avevano esperito lo stesso ambiente precedentemente alla modifica dell'aula.

Le valutazioni quantitative e qualitative, tra cui sondaggi, interviste, test biometrici e cognitivi, hanno tutte indicato che i miglioramenti biofilici della classe erano fortemente associati alla riduzione dello stress ed al miglioramento dei risultati di apprendimento.

L'aula biofilica è stata arricchita con viste sulla natura, luce diurna dinamica e diffusa e pattern frattali biomorfici:



Il fregio della carta da parati DesignTex è stato progettato su misura con caratteristiche basate sui frattali naturali delle foglie di palma.



Le moquette di Interface sono progettate per imitare i pattern frattali statistici dell'erba ondeggiante della prateria.



Le tende Mecho sono stampate riproducendo l'ombra a macchie di un albero. Il pattern dell'albero si integra facilmente con la vista del paesaggio esterno. Questo prodotto personalizzato è oggi un'opzione standard.

Immagini per gentile concessione di Craig Gauden Davis Architects. Fonte dei dati: Determan, J., Akers, M.A., Albright, T., Browning, B., Martin-Dunlop, C., Archibald, P. & Caruolo, V. (2019). The impact of biophilic learning spaces on student success. <https://cgdarch.com/knowledge/>

APPENDICE

RISORSE CONSIGLIATE

By the age of 3, children appreciate nature's fractal patterns, by Jaimee Bell (December 15, 2020). <https://bigthink.com/mind-brain/fractal-patterns-children>

Fractals in psychology and art, by Richard Taylor, University of Oregon, (February 3, 2016) <https://blogs.uoregon.edu/richardtaylor/2016/02/03/human-physiological-responses-to-fractals-in-nature-and-art/>

Fractals in architecture: The visual interest, preference, and mood response to projected fractal light patterns in interior spaces, by Abboushi, B. Elzeyadi, I., Taylor, R.P. & Sereno, M.E. (2018). *Journal of Environmental Psychology*, 61: 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2018.12.005>

The impact of biophilic learning spaces on student success, by Determan, J., Akers, M.A., Albright, T., Browning, B., Martin-Dunlop, C., Archibald, P. & Caruolo, V. (2019). <https://cgdarch.com/wp-content/uploads/2019/12/The-Impact-of-Biophilic-Learning-Spaces-on-Student-Success.pdf>

BIBLIOGRAFIA

Abboushi, B., Elzeyadi, I., Taylor, R.P. & Sereno, M.E. (2018). Fractals in architecture: The visual interest, preference, and mood response to projected fractal light patterns in interior spaces. *Journal of Environmental Psychology*, 61: 57-70. 10.1016/j.jenvp.2018.12.005.

Aks, D.J. & Sprott, J. (1996). Quantifying aesthetic preference for chaotic patterns. *Empirical Studies of the Arts*, 14: 1-16.

Albright, T.D. (2015). Neuroscience for architecture. In S. Robinson & J. Pallasmaa (Eds.). *Mind in architecture: Neuroscience, embodiment and the future of design*, 197-217. Cambridge, MA: MIT Press.

Bies, A.J., Blanc-Goldhammer, D.R., Boydston, C.R., Taylor, R. & Sereno, M. (2016). Aesthetic responses to exact fractals driven by physical complexity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(May): 1-17.

Browning, W.D. & Ryan, C.O. (2020). *Nature Inside, A Biophilic Design Guide*. London: RIBA Publishing.

Browning, W.D., Ryan, C.O., Kallianpurkar, N., Labruto, L., Watson, S. & Knop, T. (2012). The Economics of Biophilia, Why Designing with Nature in Mind Makes Financial Sense. First edition. New York: Terrapin Bright Green.

Browning, W.D., Ryan, C.O. & Clancy, J.O. (2014). 14 Patterns of Biophilic Design: Improving health and wellbeing in the built environment. New York: Terrapin Bright Green.

Cannon, J.W., Floyd, W.J. & Parry, W.R. (2001) Finite subdivision rules. *Conformal Geometry and Dynamics*, 5: 153-196.

Cutting, J.E. & Garvin, J.J. (1987). Fractal curves and complexity. *Perception & Psychophysics*, 42: 365-370.

Determan, J., Akers, M.A., Albright, T., Browning, B., Martin-Dunlop, C., Archibald, P. & Caruolo, V. (2019). The impact of biophilic learning spaces on student success. Retrieved from <https://cgdarch.com/wp-content/uploads/2019/12/The-Impact-of-Biophilic-Learning-Spaces-on-Student-Success.pdf>

Eglash, R. (2002). *African Fractals: Modern Computing and Indigenous Design*. London, Rutgers University Press.

Fairbanks, M.S. & Taylor, R. (2011). Measuring the scaling properties of temporal and spatial patterns: from the human eye to the foraging albatross. *Nonlinear Dynamical Systems Analysis for the Behavioral Sciences Using Real Data*, 341-366.

Field, D.J. & Brady, N. (1997). Visual sensitivity, blur and the sources of variability in the amplitude spectra of natural scenes. *Vision Research*, 37: 3367-3383.

Franklin, N. (2020). Mental health challenges cost employers £45 billion each year. See <https://workplaceinsight.net/mental-health-challenges-cost-employers-45-billion-each-year/> Accessed 19 February 2020.

Fromm, E. (1964). *The heart of man*. New York, NY: Harper & Row.

Geake, J. & Landini, G. (1997). Individual differences in the perception of fractal curves. *Fractals*, 5: 129-143.

Gifford, R., Hine, D.W., Muller-Clemm, W. & Shaw, K.T. (2002). Why Architects and Laypersons Judge Buildings Differently. *J. Architecture and Planning Research*, 19(2): 131-148.

Hägerhäll, C., Laike, T., Taylor, R., Küller, M., Küller, R. & Martin, T. (2008). Investigations of human EEG response to viewing fractal patterns. *Perception*, 37(10), 1488-1494.

Hägerhäll, C., Purcell, T. & Taylor, R. (2004). Fractal dimension of landscape silhouette outlines as a predictor of landscape preference. *Journal of Environmental Psychology*, 24(2), 247-255.

Hägerhäll, C., Laike, T., Küller, M., Marcheschi, E., Boydston, C. & Taylor, R. (2015). Human physiological benefits of viewing nature: EEG responses to exact and statistical fractal patterns. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 19(1): 1-12.

Gombrich, E.H. (1984). *The sense of order: A study in the psychology of decorative art*. NY: Cornell University Press.

Juliani, A.W., Bies, A.J., Boydston, C.R., Taylor, R. & Sereno, M. (2016). Navigation performance in virtual environments varies with fractal dimension of landscape. *Journal of Environmental Psychology*, 47: 155-165.

Kaplan, R. & S. Kaplan (1989). *The experience of nature: A psychological perspective*. New York, NY: Cambridge University Press.

Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of Environmental Psychology*, 15(3), 169-182.

Kellert, S. (2005). *Building for Life: Designing and understanding the human-nature connection*. Washington, DC: Island Press.

- Kellert, S. & Calabrese, E. (2015). The Practice of Biophilic Design. Available Online at: www.biophilic-design.com.
- Kellert, S.R., Heerwagen, J.H. & Mador, M. (2008). *Biophilic Design: The Theory, Science, and Practice of Bringing Buildings to Life*. Hoboken, NJ: John Wiley.
- Knill, D.C., Field, D. & Kersten, D. (1990). Human discrimination of fractal images. *Journal of the Optical Society of America*, 77: 1113-1123.
- Lee, K.E., Williams K.J.H., Sargent L.D., Williams, N.S.G. & Johnson, K.A. (2015). 40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration, *Journal of Environmental Psychology*, 42: 182-189.
- Mandelbrot, B.B. (1967). How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science*, 156(3775): 636-638.
- Mandelbrot, B.B. (1983). The fractal geometry of nature. *American Journal of Physics*, 51, 286; <https://doi.org/10.1119/1.13295>
- Mandelbrot, B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. Freedman, W.H., New York.
- Marlow, C.A., Viskontas, I.V., Matlin, A., Boydston, C., Boxer, A. & Taylor, R.P. (2015). Temporal structure of human gaze dynamics is invariant during free viewing. *PLoSone*, 10, e0139379.
- Mehaffy, M.W. & Salingaros, N.A. (2015). *Design for a living planet: settlement, science, and the human future*. Portland, OR: Sustasis Press.
- Robles, Kelly E., Nicole A. Liaw, Richard P. Taylor, Dare A. Baldwin & Margaret E. Sereno (2020). A shared fractal aesthetic across development, *Humanities and Social Sciences Communications*, 7:158. <https://doi.org/10.1057/s41599-020-00648-y>
- Salingaros, N. A. (2012). Fractal Art and Architecture Reduce Physiological Stress. *Journal of Biourbanism*, 2, 11-28.
- Smith, N. (3/29/2012). Employees reveal how stress affects their jobs. CNBC. Retrieved February 11, 2020 from <https://www.cnbc.com/id/46891956>
- Smith, J., Rowland, C., Moslehi, S., Taylor, R., Lesjak, A., Lesjak, M., Stadlober, S., Lee, L., Dettmar, J., Page, M. & Himes, J. (2020). Relaxing Floors: Fractal Fluency in the Built Environment. *Journal of Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 24, 127.
- Spehar, B., Clifford, C.W.G., Newell, B.R. & Taylor, R.P. (2003). Universal aesthetic of fractals. *Computers & Graphics*, 27(5): 813-820.
- Spehar, B. & Taylor, R. (2013). Fractals in Art and Nature: Why do we like them?. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 8651. 18-. [10.1117/12.2012076](https://doi.org/10.1117/12.2012076).
- Spehar, B., Wong, S., van de Klundert, S., Lui, J., Clifford, C.W.G. & Taylor, R.P. (2015). Beauty and the beholder: the role of visual sensitivity in visual preference. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9: 1-12.
- Spehar, B., Walker, N. & Taylor, R. (2016). Taxonomy of individual variations in aesthetic responses to fractal patterns. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10(July), 1-18.
- Street, N., Forsythe, A., Reilly, R.G., Taylor, R.P., Boydston, C. & Helmy, M.S. (2016). A complex story: Universal preference vs. individual differences shaping aesthetic response to fractals patterns? *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 213.
- Taylor, R.P. (1998). Splashdown. *New Scientist*, 2144, 30-31.
- Taylor, R.P. (2002). Order in Pollock's chaos. *Scientific American*, 287: 116-121.
- Taylor, R.P. (2006). Reduction of physiological stress using fractal art and architecture, *Leonardo*, 39, 245-251.
- Taylor, R.P., Guzman, R., Martin, T.M., Hall, G., Micolich, A.P., Jonas, D., ... Marlow, C.A. (2007). Authenticating Pollock paintings with fractal geometry. *Pattern Recognition Letters*, 28: 695-702.
- Taylor, R.P., Juliani, A.W., Bies, A.J., Spehar, B., & Sereno, M.E. (2018). The implications of fractal fluency for bioinspired architecture. *Journal of Biourbanism*, 6, 23-40.
- Taylor, R.P., Micolich, A.P. & Jonas, D. (1999). Fractal analysis of Pollock's drip painting. *Nature* 399, 422.
- Taylor, R.P., Micolich, A.P. & Jonas, D. (2002). The construction of fractal drip paintings. *Leonardo*, 35: 203-207.
- Taylor, R.P. & Spehar, B. (2016). Fractal Fluency: An Intimate Relationship Between the Brain and Processing of Fractal Stimuli. In: Di leva A. (eds) *The Fractal Geometry of the Brain*. Springer Series in Computational Neuroscience. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3995-4_30
- Taylor, R.P. Spehar, B., von Donkelaar, P. & Hägerhäll, C.M. (2011). Perceptual and physiological responses to Jackson Pollock's fractals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 1-13.
- Taylor, R.P., Martin, T.P., Montgomery, R.D., Smith, J.H., Micolich, A.P., Boydston, C., ... Spehar, B. (2017). Seeing shapes in seemingly random spatial patterns: fractal analysis of Rorschach inkblots. *PLoSone*, 12, e0171289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171289>.
- Taylor, R.P. & Sprott, J.C. (2008). Biophilic fractals and the visual journey of organic screen-savers. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 12, 117-129.
- Ulrich, R.S. (1981). Natural versus urban scenes: Some psychophysiological effects. *Environment and Behavior*, 13(5), 523-556.
- Ulrich, R.S. (1984). View through a window may influence recovery from surgery. *Science*, 224(4647), 420-421. <http://doi.org/10.1126/science.6143402>.
- Viswanathan, G.M., Afanasyev, V., Buldyrev, S.V., Murphy, E.J., Prince, P.A. & Stanley, H.E. (1996). Lévy flight search patterns of wandering albatrosses, *Nature*, 381, 413 - 415.
- Wilson, E. O. (1984). *Biophilia*. Cambridge, MA: Harvard University Press. ISBN 0-674-07442-4.

A causa della complessità della traduzione della scienza frattale nelle applicazioni di progettazione, questa pubblicazione fornisce un'introduzione di alto livello all'argomento. Le sfumature associate alla caratterizzazione dei frattali per specifici benefici sulla salute sono limitate agli articoli scientifici *peer-reviewed* citati all'interno del documento. Il toolkit è una guida; gli autori e i proprietari non possono attestare l'efficacia dei prodotti creati a seguito dell'utilizzo delle informazioni fornite in questa pubblicazione. Se tale efficacia è essenziale per il successo di un progetto, il progettista è incoraggiato a richiedere la consulenza di esperti.

Per ulteriori informazioni sui frattali o sulla progettazione biofilica, contattare l'autore (rita.trombin@biofilia.net) o Terrapin Bright Green (biophilia@terrapinbg.com). Per scaricare o condividere pubblicazioni aggiuntive senza alcun costo, visitare il sito TerrapinBrightGreen.com/publications.